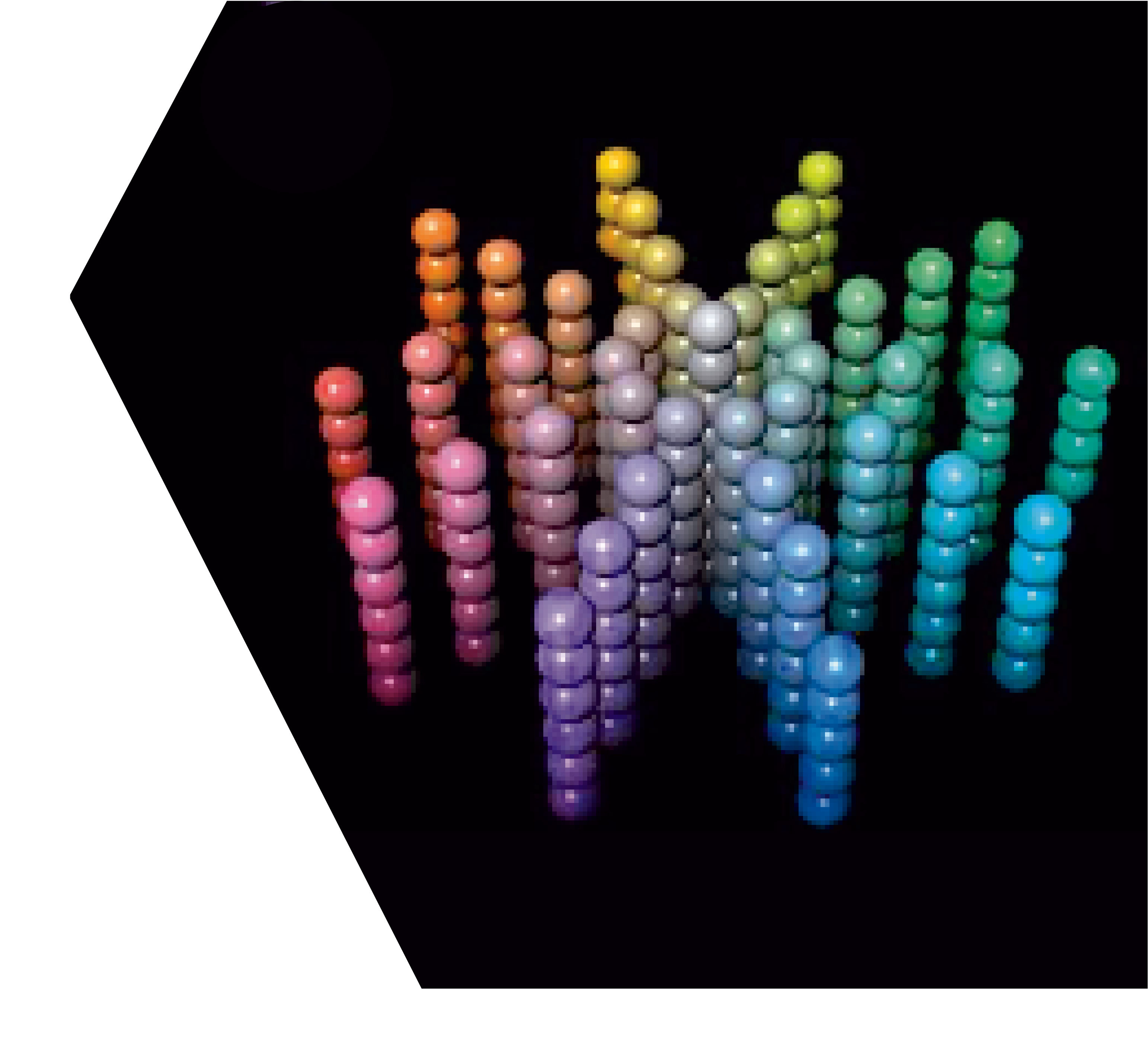


Марк Д. Фершильд

МОДЕЛИ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

Второе издание
2004

Перевод А.Шадрина © 2006

Оформление перевода сохраняет стиль оформления оригинального издания

По мнению переводчика, русскоязычный текст может быть открыт для широкого ознакомления, так как формально уже не является точной копией оригинального документа. Вместе с тем, поскольку оригинальный текст книги официально приобретен переводчиком в частное пользование, он оставляет за собой право распорядиться собственностью по личному усмотрению.

COLOR APPEARANCE MODELS

Second Edition

Mark D. Fairchild

Munsell Color Science Laboratory
Rochester Institute of Technology, USA

2004

Перевод: *А. Е. Шадрин*
Научная редакция перевода: *А. А. Френкель*
Литературная редакция перевода: *А.В. Захарченко*

ПРЕДИСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА

Фундаментальное знание специалиста, работающего с изображениями, — это, в первую очередь, знание (и понимание) *физиологических* законов цветового восприятия простых и сложных зрительных стимулов, а также знание законов цветорепродукционного процесса. Поэтому, если рассуждать вне технического и технологического контекстов цветовоспроизведения, апеллируя лишь к корневому смыслу происходящего, то между цветорепродукционным процессом и процессом моделирования цветового восприятия (оригинала и его будущей репродукции) можно уверенно поставить знак равенства.

Важно обратить внимание читателя на то, что словосочетание «Color Appearance Models» не имеет эквивалента в русском языке и в максимально близком переводе звучит как «Модели *результатов* цветового восприятия». Однако из соображений удобочитаемости и удобства дальнейшего использования здесь и далее оно будет переводиться как «Модели цветового восприятия», где «цветовое восприятие» означает не сам процесс зрительной перцепции цветовых стимулов, но конечный результат этого процесса. Очевидно, что достоверный прогноз результатов цветового восприятия зрительных стимулов, лежит в сфере непосредственных, прикладных интересов всех отраслей, работающих с изображениями, а именно: фотографии, полиграфии, кино, телевидения, WEB-индустрии.

«Модели цветового восприятия» — это современное и фундаментальное учебное пособие, закладывающее смысловой базис высшего профессионального образования в сфере работы с изображениями.

Отметим, что материал требует тщательного, последовательного и вдумчивого *изучения*, но не пролистывания и диагонального просматривания (что часто случается в обстановке поточного производства).

Алексей Шадрин,
Санкт-Петербург, 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ К СЕРИИ

О сколько цветов зрит око наше!

В отношении такого могучего труда, как «Модели цветового восприятия», сей эпиграф звучит высокопарно и банально, но… точнее о цвете не скажешь.

Все началось с того, что Международная комиссия по освещению (Comission Internationale de l`Eclairage — CIE) заложила основу современной колориметрии, на базе которой ученые разных стран — в надежде найти универсальную модель, объясняющую то, как люди «видят цвета», а точнее, воспринимают цветовые стимулы (электромагнитную энергию с данным спектральным распределением при данных условиях просмотра) — разработали теории и поверили их практикой. Однако, подобно эйнштейновской общей теории поля, ни одна универсальная модель цветового восприятия так и не была закончена и протестирована, хотя, конечно же, нельзя сбрасывать со счетов и тот колоссальный прогресс, что имел место в последние пятнадцать лет.

Сегодня в издательстве «Wiley-IS&T» вышла вторая книга рубрики «Наука и технология изображений» — новое издание монографии Марка Д. Фершильда «Модели цветового восприятия». Этот фундаментальный труд дает всеохватное, детальное и ясное описание пути развития науки о цвете за период с 1998 года по настоящий момент, необходимое нам для глубокого понимания сегодняшних теорий и практических достижений. Не вызывает сомнения и то, что вдумчивое изучение «Моделей цветового восприятия» является обязательным для любого специалиста, работающего с цветом, будь он производственник или ученый.

Теперь рассмотрим ряд реальных, так сказать, «жизненных» проблем, решение которых мы находим в «Моделях цветового восприятия»:

— Цифровые фотокамеры для компенсации цветовых сдвигов при смене осветителя (например, при переходе от дневного света к лампам накаливания) «научились» автоматически балансировать свои красно-зелено-синие экспочувствительности, однако все эти «глобальные» поправки не отражают способности зрительной системы человека избирательно адаптироваться к сложноосвещенным сценам (таким, как, к примеру, восход в пустыне или закат в горах). Развитые модели цветового восприятия дают нам возможность создавать алгоритмы, способные анализировать полное изображение, сегментируя его по «разным» осветителям прямо во время съемки, и выполнять локальные коррекции, эквивалентные работе зрительной системы человека.

— Еще одна сугубо практическая задача, в решении которой не обойтись без моделей цветового восприятия, — это ответ на вопрос: каким образом производителю струйных принтеров разработать должную комбинацию чернил и полутоновых алгоритмов, минимизирующих цветовые сдвиги на отпечатке, рассматриваемом при различном освещении (солнечном, пасмурном, лампах накаливания, флуоресцентном свете и пр.)?

Это лишь две важнейших практических проблемы, которые могут быть решены только благодаря тому, что сделаны серьезные шаги в направлении создания единой и универсальной модели цветового восприятия.

ОБ АВТОРЕ

Марк Фершильд получил степени бакалавра и магистра цветоведения в Рочестерском технологическом институте, а степень доктора науки о зрении — в Рочестерском Университете. После прохождения докторантуры Марк вернулся в технологический институт, где уже более четырнадцати лет руководит исследовательской работой Манселловской научной лаборатории по цвету (МНЛЦ является одним из секторов Научного центра визуализации изображений имени Честера Ф. Карлсона).

Сегодня Марк — директор Манселловской лаборатории и лидер новой плеяды ученых, развивших и расширивших «классическую» науку о цвете, основоположниками которой были Дж. фон Криз, В.Д. Райт, Д.Л. Мак-Адам, Г. Вышецкий, В.С. Стайлс, Р.В.Г. Хант и другие исследователи. Ученые нового поколения — Б.В. Ванделл, Б.В. Фант, Г.Д. Финлейсон и Д.Р. Вильямс, — объединив результаты исследований человеческого зрения с цветовыми измерениями, подготовили почву для создания единой универсальной теории цветового восприятия.

Обнадеживает и радует то, что мы наконец стали вести хронику научно-практических достижений Марка и его коллег.

МАЙКЛ А. КРИСС
Научные лаборатории компании Kodak
(Eastman Kodak Research Laboratories),
Рочестерский университет


YELLOW
COLOR FAN
PURPLE
PURPLE-BLUE
BLUE

Марк Д. Фершильд

МОДЕЛИ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

2-Я РЕДАКЦИЯ

Рочестерский технологический институт
Манселловская научная лаборатория по цвету

2006

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Даже если бы некто знал закон пропорции, по которому образуются цвета, он не смог бы ясно описать их природу и дать им разумное и толковое объяснение.

Платон

Вопреки предостережению Платона наша книга посвящена главным проблемам науки о цвете, усилиям, направленным на их решение, а также вопросам технологии цветовоспроизведения.

Сегодня основная задача состоит в том, чтобы научиться прогнозировать цветовое восприятие стимулов, воздействующих на зрительную систему человека в сложной, т.е. естественной обстановке. Практического решения данной проблемы ждут во многих отраслях промышленности, в частности в светотехнике, материаловедении, полиграфии и фотографии.

В светотехнике модели цветового восприятия нужны для прогнозирования цветопередающих свойств различных источников освещения, поскольку позволяют специфицировать последние не только по их эффективности, но и по качеству.

В материаловедении (покрытия, пластмассы, текстиль и пр.) модели цветового восприятия необходимы для спецификации цветовых допусков в широком диапазоне условий просмотра, а также для более точной оценки метамеризма.

В сфере работы с изображениями высокоточные и практичные модели цветового восприятия пользуются сегодня наибольшим спросом: стремительное развитие технологии цветовоспроизведения, в особенности на рынке DTP (настольные издательские системы), привело к появлению т.н. систем управления цветом (CMS). Общепризнанно, что CMS требуют наличия моделей цветового восприятия, дабы изображение, созданное на одном носителе и рассматривавшееся при неких условиях просмотра, могло быть по крайней мере удовлетворительно репродуцировано на другом носителе и в других условиях просмотра.

Однако, несмотря на то, что необходимость в моделях цветового восприятия очевидна, их развитие долгое время ограничивалось дебатами в академических журналах и на конференциях.

Наша книга расскажет о фундаментальных проблемах в сфере моделирования цветового восприятия, а также о сегодняшних методах их решения (что в равной степени интересно и тем, кто ждет сугубо практических рекомендаций, и тем, кто ищет почвы для дальнейших научных изысканий).

Каждый из нас знает, каков цвет, но у его академического определения и точной спецификации особая история: в 1931 году Международная комиссия по освещению (CIE) предложила систему цветовых измерений, которая стала базисом современной колориметрии и позволила специфицировать цветовые

соответствия посредством т.н. трехстимульных значений CIE *XYZ*. И хотя сразу стало ясно, что для эффективной работы необходимы цветовые измерения более высокого уровня, только через 45 лет (в 1976 г.) CIE удалось позиционировать два цветовых пространства — CIELAB и CIELUV — в качестве единого стандарта на измерение цветовых отличий и установку допусков.

Несмотря на то, что колориметрическая система CIE успешно используется в течение более чем 70 лет, она по-прежнему ограничивается сравнением стимулов, идентичных между собой по всем пространственным и временны́м параметрам и рассматриваемых в одинаковых условиях, то есть: CIE *XYZ*-значения свидетельствуют лишь о том, что два стимула соответствуют (или не соответствуют) друг другу по цветовому ощущению.

CIELAB-значения могут использоваться для описания отличий между стимулами по трем размерностям их цветового восприятия (светлоте, цветовому тону и насыщенности. — *Прим. пер.*) в данных условиях просмотра.

Модели цветового восприятия поднимают классические CIE-системы на уровень, который позволяет ответить на вопрос: как будет выглядеть стимул при тех или иных условиях просмотра? То есть, применение моделей цветового восприятия дает нам возможность высокоточных спецификации, контроля и репродуцирования цвета.

Понимание сути феноменов цветового восприятия и разработка моделей их прогнозирования — темы масштабного исследования, проведенного, в частности, за последние 15–20 лет. Однако цвет по-прежнему остается предметом активных научных изысканий, движимых технологическими требованиями. И коль скоро CIE до сих пор не в состоянии предложить единую универсальную модель цветового восприятия, пригодную для всех мыслимых практических ситуаций, многие разрабатывают варианты профильных моделей, ориентированных на решение конкретных научных и производственных задач. Одной из таких задач является обеспечение эффективности систем управления цветом (color management systems), основанных на ICC-профайлах. Формат ICC-профайлов разработан Международным консорциумом по цвету (International Color Consortium — ICC) и внедрен во все современные операционные системы компьютеров. Очевидно, что управление цветом, реализуемое на основе ICC-профайлов, требует участия моделей цветового восприятия, но априори без использования каких-либо специфических инструкций по их применению.

К сожалению, фундаментальные научные концепции и феномены цветового восприятия (равно как и его модели) ранее не были сведены в единую публикацию, и любой заинтересовавшийся данным вопросом вынужден был бы «перелопатить» весь материал научных журналов и протоколов конференций за последние сто лет. Поиск и анализ первоисточников — это родная стихия исследователей, изучающих цветовое восприятие, но нет в том нужды для практикующих ученых, инженеров, программистов или производственников. Поэтому цель данной книги состоит в том, чтобы, систематизировав и обобщив всю достоверную информацию по вопросам цветового восприятия (и его популярным моделям), представить ее в едином издании.

Общая концепция нашей книги такова: вначале дается общий научный об-

зор основ цветового измерения, а также феноменов цветового восприятия (учет которых требует использования его моделей), что готовит почву для последующего описания конкретных моделей и вариантов их применения. Такой подход хорошо «обкатан» развернутыми университетскими курсами, сокращенными курсами и семинарами, в которых полный материал должен быть изложен в самые короткие сроки.

Теперь подробнее:

В главах 1–3 разговор пойдет о фундаментальных концепциях цветового зрения человека, психофизике и колориметрической системе CIE, что является необходимым условием понимания устройства и работы моделей цветового восприятия.

В главах 4–7 будут обсуждаться фундаментальные свойства цветового восприятия и его феномены. Там же дан краткий обзор классических первоисточников, на базе которых строятся сегодняшние исследования и разработка моделей.

В главах 8–9 будут описаны наиболее важные физиологические механизмы цветового восприятия, в частности, хроматическая адаптация. Модели хроматической адаптации, обсуждаемые в 9-й главе, — это фундамент моделей цветового восприятия, речь о которых пойдет дальше.

В 10-й главе мы дадим определение моделей цветового восприятия и краткое описание их общей структуры на примере цветового пространства CIELAB.

В главах 11–13 будет представлен детальный разбор моделей Наятани, Ханта и RLAB, включающий как их достоинства, так и недостатки.

В 14-й главе мы опишем модели ATD и LLAB, представляющие интерес для некоторых специфических ситуаций.

В 15-й главе речь пойдет о модели CIECAM97s, которая была утверждена CIE почти одновременно с выходом в свет первого издания нашей книги (поэтому в первом издании модель была дана в приложении). Вместе с тем в главу включено описание упрощенной версии CIECAM97s — модели ZLAB.

16-ая глава расскажет о недавно появившейся CIECAM02, являющейся серьезным усовершенствованием CIECAM97s и, несомненно, лучшей моделью из всех существующих сегодня.

В главах 17–18 будут рассмотрены методы тестирования моделей цветового восприятия, основанные как на различных визуальных экспериментах, так и на колориметрическом применении моделей.

В главе 19 будет дан обзор принципов аппаратно-независимого цветовоспроизведения, которое, стоит отметить, сильнее всего стимулировало развитие моделей цветового восприятия.

В последней, 20-й, главе мы сформулируем концепцию *моделей восприятия изображений*[1] как направление дальнейших исследований в области моделирования цветового восприятия, а в качестве примера опишем модель iCAM.

---

[1] Изображений — как высокодифференцированных сложных зрительных стимулов, в отличие от простых, единичных цветовых стимулов, представляющих интерес моделей цветового восприятия. — *Прим. пер.*

Несмотря на то, что моделирование цветового восприятия остается весьма молодой областью научного исследования, которое будет продолжаться и далее, по крайней мере в ближайшем будущем, наша книга в основном содержит в себе устоявшийся материал, неизменность которого не вызывает сомнений: в главах с 1 по 10-ю дается обзор фундаментальных концепций, описание феноменов восприятия и методов работы (которые если и изменятся, то весьма незначительно). Таким образом, главы первой половины нашей книги — это базис для дальнейших рассуждений.

Тестирование моделей и их применение, описанные далее, находятся в процессе непрерывного научного развития, и вторая половина нашей книги — это, если угодно, «стоп-кадр» текущего положения дел.

Для того чтобы читатель мог всегда оставаться в курсе событий, организована web-страница www.cis.rit.edu/Fairchild/CAM.html, на которой периодически публикуются наиболее важные материалы и новости. Там же можно найти XLS-таблицу, содержащую в себе примеры вычислений.

* * *

«Да» — я молвила в ночи,
«Нет» — с рассветом говорю:
Красок тех, что от свечи,
Не узнать нам поутру.

Элизабет Барретт Браунинг

БЛАГОДАРНОСТИ

Проект, подобный данной книге, неосуществим силами одного лишь автора. Я бесконечно благодарен моей семье за ее неоценимую поддержку.

Исследования и поиск нужной информации легли на плечи моих студентов: без их неустанной работы большая часть исследования не могла быть завершена, и я не рассказал бы так много о моделях цветового восприятия, если бы не их острое желание узнать как можно больше. Я глубоко обязан моим студентам и друзьям — всем, кто вместе со мной занимался исследованиями, кто периодически работал в Манселловской научной лаборатории по цвету, всем, кто слушал мои университетские и сокращенные курсы. Нет возможности перечислить всех поименно, не забыв о ком-то, поэтому я немного слукавлю и поблагодарю всех просто как единый коллектив.

Я обязан всем тем, кто рецензировал главы первого издания «Моделей» и сердечно благодарю: Пауля Дж. Алесси, Эдвина Бренемана, Кена Дэвидсона, Рона Гентиля, Роберта Ханта, Линдсея Мак-Дональда, Майка Поинтера, Майкла Стоукса, Джефри Ванга, Эрика Цайзе и Валерия Зелентая.

Спасибо издательству Adison-Wesley, убедившему меня написать эту книгу и опубликовать ее. Спасибо IS&T (Обществу науки и технологии изображений) и персонально Кальве Леонард — я был счастлив работать со всеми сотрудниками IS&T на протяжении всей моей карьеры специалиста по цветовоспроизведе-

нию. Спасибо издательству John Wiley & Sons, Ltd за предложение опубликовать второе издание «Моделей».

Спасибо всем промышленным и правительственным спонсорам за возможность вести исследования и учебный процесс на базе Манселловской научной лаборатории по цвету Рочестерского технологического института. Персональная благодарность Тору Олсону, сотруднику Management Graphics, предоставившему камеру «Opal» и 120 цифровых задников, использованных для иллюстрирования первого издания (свидетельством технологического прогресса в цветовоспроизведении является то, что для второго издания не понадобилось ни одной твердой копии необходимых изображений!).

Моя искренняя признательность лично Валери Хеминк, которая в роли административного ассистента Манселловской научной лаборатории по цвету обеспечила твердую и блестящую поддержку моих стараний.

Наконец (но не в последнюю очередь!), я искренне благодарю Колиен Десимон за ее участие, дружбу и прекрасную работу в роли внешнего координатора МНЛЦ, в частности за ее помощь при подготовке второго издания «Моделей».

Я не смог бы обойтись без славных Вэла и Коллина, своевременно доставлявших меня к месту работы.

Если бы не все мои дорогие друзья — не было бы второго издания этой книги.

МАРК Д. ФЕРШИЛЬД,
Ханойфоллс, Нью-Йорк

Ты покинешь поле с чувством новой жизни,
Если ты сыграешь сердцем всем своим.

Майкл Мерфи «Гольф в королевстве»

ВВЕДЕНИЕ

Стоящее прежде него — не имеет начала, и даже когда продолжается — не имеет конца. Оно существует сейчас: им пользуются, идут за ним и приходят к истокам.

Тао Ти Чинг, 300–600 гг. до н. э.

Подобно красоте, цвет рождается в сознании наблюдателя. От момента появления науки как таковой интерес к природе цветового восприятия не ослабевает, но, несмотря на сегодняшнее бурное развитие технологии, фундаментальные научные вопросы по-прежнему остаются без ответа. Многие ученые пытаются объяснить цвет, апеллируя лишь к физическим характеристикам света и объектов, однако без наблюдателя, то есть — человека — никакого цвета не бывает. Часто спрашивают: существует ли звук падающего дерева, если нет слушателя? С тем же успехом этот вопрос можно отнести и к цвету его листьев…

ЧТО ТАКОЕ МОДЕЛЬ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ?

Обычно говорят, что свет с данными длинами волн или точно известный коэффициент спектрального отражения поверхности объектов — это, собственно, и есть цвет, однако такое утверждение — это попытка низвести понимание цвета до уровня простого физического толкования. Безусловно более верным является утверждение, что физически существуют лишь *стимулы*, рождающие цветовые ощущения, характер которых зависит от условий просмотра этих стимулов.

Попытки описать цвет с сугубо физических позиций относятся к области *спектрофотометрии* и *спектрорадиометрии*.

Раскладывая визуальный ответ низшего уровня на составляющие, мы входим в область *колориметрии*.

Когда в целях наиболее полного описания восприятия цветовых стимулов принимаются во внимание многие другие переменные — исследование оказывается в сфере *моделирования цветового восприятия*. Последнее и есть предмет нашей книги.

Теперь обратимся к простым и сугубо бытовым наблюдениям:

— свет фар приближающегося автомобиля почти что ослепляет нас ночью, но едва различим днем;

— по мере того как свет становится все более и более тусклым, цвета «вянут», но объекты остаются вполне различимыми;

— звезды днем не видны;

— стены недавно окрашенной комнаты существенно отличаются по цвету от пробной выкраски;

— одна и та же фотография в разных паспарту воспринимается по-разному;

— отпечатки не соответствуют оригиналам, отображенным на экране монитора;

— сцена воспринимается более красочной и контрастной солнечным днем;

— синие и зеленые объекты становятся неразличимыми при тусклом освещении;

— рано утром почти невозможно разобраться в оттенке темных носков (например, черных, коричневых или синих) и подобрать парный;

— не существует серой или коричневой электролампочки;

— не существует красно-зеленого или желто-синего цветов.

Ни один из вышеперечисленных феноменов невозможно объяснить путем физических измерений материалов и/или освещения. Чтобы выполнять достоверные прогнозы подобных эффектов, физические измерения должны быть объединены с некими иными измерениями, выполненными при фактических условиях просмотра, а полученные данные обработаны моделями человеческого зрительного восприятия. Каждое из описанных выше наблюдений (и множество других, сходных с ними) может быть объяснено различными феноменами цветового восприятия и учтено его моделями, однако с помощью существующей техники цветовых измерений, называемой иногда *базовой колориметрией,* они не могут быть истолкованы никоим образом.

Наша книга детализирует отличие базовой колориметрии от моделей цветового восприятия, дает общеконцептуальное толкование процесса человеческого зрения и его феноменов, а также предлагает примеры использования моделей цветового восприятия при решении текущих технологических задач, в частности таких, как цифровое цветовоспроизведение. По прочтении «Моделей цветового восприятия» читатель сможет легко объяснить каждый из зрительных феноменов, описанных выше.

Базовая колориметрия дает нам фундаментальные методы цветовых измерений, используемых для спецификации цветовых стимулов в логике их сенсорного потенциала (применительно к некоему усредненному наблюдателю). Однако сами по себе эти методы могут быть использованы лишь для определения того, соответствуют ли два стимула друг другу по зрительному ощущению или нет в одинаковых условиях просмотра.

Высшая колориметрия (advanced colorimetry) имеет целью поднять базовые колориметрические методы на уровень спецификации цветовых отличий по перцепционным размерностям, то есть в конечном счете на уровень описания самоего цветового восприятия.

Методы спецификации цветовых отличий, разработанные и усовершенствованные в последние два десятилетия, достигли такого уровня, что некоторые из них приняты в качестве международных стандартов, однако заключительным этапом исследования являются модели цветового восприятия, поскольку именно они призваны дать математическое описание восприятия стимула в широком диапазоне различных условий просмотра. Отметим, что модели цветового вос-

приятия, оставаясь в течение последних двадцати лет предметом сугубо научных изысканий, в последнее время стали остро востребованы практикой: они начинают находить активное применение в системах цветовоспроизведения, совершенствуя методики управления цветом. Последние требуют от ученых, инженеров, программистов, специалистов по изображениям и пр. четкого понимания идеологических основ, конструкции и возможностей моделей цветового восприятия.

Чтобы лишний раз не усложнять изучение материала, дадим толкование описанных зрительных эффектов:

— изменение в восприятии света фар приближающегося автомобиля может быть в целом объяснено процессами световой адаптации и описано законом Вебера;

— «угасание» цветов при тусклом освещении (но без потери видимости объектов) объясняется переходом от трихроматического колбочкового зрения к монохроматическому палочковому;

— приращения интенсивности свечения звезд по отношению к фотометрической яркости дневного неба недостаточно для того, чтобы звезды стали видимыми, в то время как при той же яркости, но на ночном небосклоне — звезды отчетливо видны. Последнее легко объясняется изменением визуального порога восприятия;

— цвет образца не соответствует цвету стены, поскольку изменились размер, окружение и освещенность цветового стимула;

— изменение цвета окружения (или фона) глубоко влияет на восприятие стимула (что может иметь огромное значение для фотографов и живописцев);

— даже если монитор и принтер тщательно откалиброваны и точно характеризованы, отличия в носителях, белых точках, уровне фотометрической яркости и окружении все равно приведут к тому, что отпечатанное изображение будет существенно отличаться от оригинала;

— явное увеличение полноты цвета и контраста сцены при повышении уровня освещенности объясняются эффектами Ханта и Стивенса;

— низкий уровень освещенности при свете ламп накаливания не в состоянии обеспечить энергию, необходимую для запуска в зрительной системе человека механизма коротковолновой чувствительности, благодаря чему зеленые объекты неотличимы от синих;

— при тусклом утреннем свете способность к цветовому восприятию стимулов понижена;

— восприятие серого и коричневого возникает только в отношении т.н. неизолированных цветовых стимулов, и, таким образом, источники освещения не могут быть серыми или коричневыми, поскольку являются наиболее яркими элементами сцены;

— ощущение зеленого и красного цветовых тонов (или желтого и синего) не может быть одновременным, поскольку кодируется в нашей зрительной системе т.н. биполярным способом.

А теперь, дорогие друзья, начнем чтение и станем постепенно отпирать замки тайн цветового восприятия.

1 ЦВЕТОВОЕ ЗРЕНИЕ ЧЕЛОВЕКА

Модели цветового восприятия призваны поднять базовую колориметрию на уровень, описывающий восприятие цветового стимула в широком диапазоне возможных условий просмотра. Для того чтобы полностью разобраться в принципах создания, устройства и применения моделей цветового восприятия, необходимо вникнуть в ряд фундаментальных положений науки о цвете, которым и посвящены первые главы данной книги. Поскольку цветовое восприятие относится к сфере нашего визуального опыта, любая система, разработанная для предсказания корреляций с этим опытом, должна в той или иной степени основываться на морфологии и физиологии зрительной системы человека, поэтому все модели цветового восприятия, описанные в данной книге, построены на этой основе. Иными словами: понять суть различных моделей проще, если освоить азы анатомии и физиологии зрительной системы человека. Наша книга начинается с освещения именно этих вопросов.

Наука о зрении обширна и увлекательна, но в рамках одной главы можно дать лишь краткий обзор тем, необходимых для изучения моделей цветового восприятия, тогда как для углубленного изучения читателю рекомендуются: обзор о механизме цветового зрения Ленни и Д'Змура (1988), статья Кайзера и Бойнтона о цветовом зрении человека (1996), популярная статья Ванделла об основах зрения (1995), обширный труд Пальмера (1999), подборки о цветовом зрении Бакгауза и коллег (1998), а также труды Гегенфуртнера и Шерпа (1999), — в этих работах можно найти подробности, касающиеся большей части материалов данной главы.

1.1 ОПТИКА ГЛАЗА

Наше зрительное восприятие начинается с глаза и непосредственно зависит от его анатомической структуры. На рисунке 1.1 представлены основные элементы оптической системы человеческого глаза. Глаз работает аналогично фотокамере. Роговица и хрусталик действуют совместно (подобно тому как действуют вместе линзы фотообъектива), фокусируя видимый мир на сетчатой оболочке глазного дна, которая, в свою очередь, подобна фотопленке или иному светочувствительному материалу. Эти и другие структуры оказывают радикальное влияние на наше цветовое восприятие.

Роговица

Роговица — это передняя внешняя прозрачная поверхность глазного яблока, через которую проникает свет. Роговица — это самый главный из элемен-

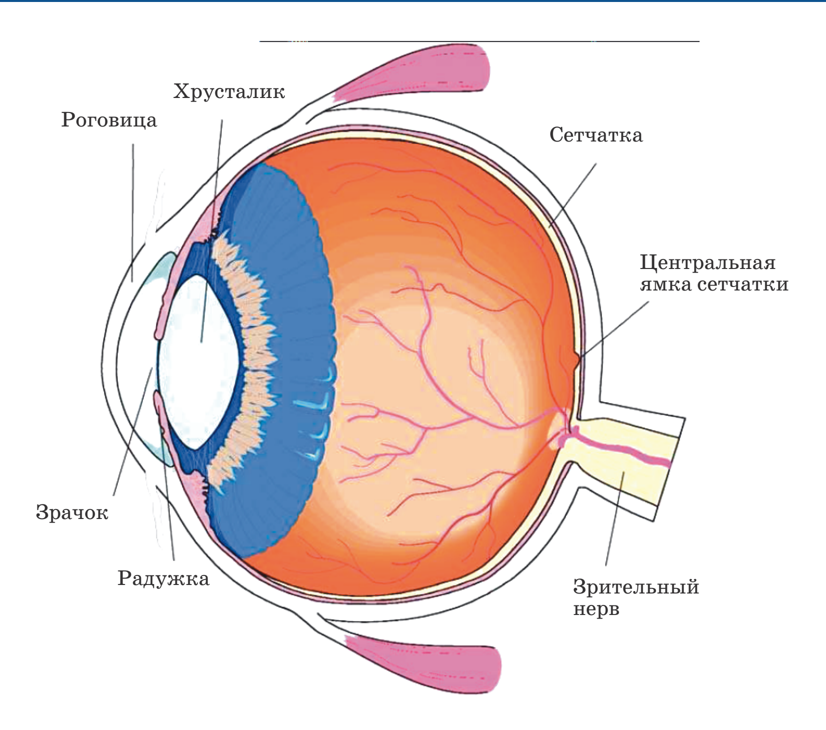


Рис. 1.1 Схема устройства человеческого глаза.

тов, формирующих изображение, так как его изогнутая поверхность, находясь в непосредственном контакте с воздухом, обеспечивает наибольшее изменение коэффициента преломления в оптической системе глаза. Роговица аваскулярна (не имеет кровеносных сосудов. — *Прим. пер.*) и получает питательные вещества из окружающих ее маргинальных капилляров и жидкостей. Дефекты преломления, такие, как близорукость (миопия), дальнозоркость (гиперопия) или астигматизм, могут являться следствием изменений кривизны роговицы и порой успешно корректируются лазерной хирургией.

Хрусталик

Хрусталик выполняет функцию т.н. аккомодации зрения и представляет собой слоистую гибкую структуру с неравномерным коэффициентом преломления. Хрусталик — это естественный индексградиентный элемент с максимальным коэффициентом преломления в его центре и минимальным на периферии. Такая особенность хрусталика снижает вероятность аберраций, присущих всем простым оптическим системам.

Кривизна хрусталика регулируется т.н. цилиарными мышцами. Когда мы вглядываемся в ближний объект, хрусталик становится «толстым», увеличивая тем самым свою оптическую силу и позволяя нам сфокусировать зрение на ближних объектах. Когда мы вглядываемся в дальний объект, хрусталик «уплощается», теряя свою оптическую силу и приводя удаленные объекты к резкости.

Поскольку мы стареем, внутренняя структура хрусталика меняется, он становится менее эластичным, а, как правило, к пятидесяти годам теряет эластич-

ность полностью, и наблюдатель уже не может сфокусировать зрение на ближних объектах (пресбиопия или «старый глаз»). В этот период большинство людей при чтении начинает пользоваться очками.

Наряду с отвердением хрусталика повышается его оптическая плотность. Хрусталик поглощает и рассеивает коротковолновую световую энергию (синий и фиолет), и по мере его отвердения степень поглощения и рассеивания растет. Иными словами, с годами хрусталик все больше желтеет, и хотя благодаря различным механизмам хроматической адаптации мы не осознаем возрастных изменений, все же с возрастом мы начинаем смотреть на мир через желтый фильтр, который не только меняется с годами, но и сильно отличается от наблюдателя к наблюдателю.

Описанные эффекты активно проявляют себя в ситуациях, когда возникает необходимость выполнить экспертное цветовое сравнение или сравнение цвета вместе с другими наблюдателями, и особенно — при рассматривании фиолетовых объектов, потому что старый хрусталик поглощает большую часть «синей» энергии, отраженной от фиолетового объекта, но нейтрален в отношении отраженной «красной» энергии. В результате пожилым наблюдателям (в отличие от молодых) объект представляется более красным. Проблема старения хрусталика и ее влияние на зрительное восприятие описаны Покорни с коллегами (1987), Вернером и Шефрин (1993) и Шефрин и Вернером (1993).

Жидкости

Пространство между роговицей и хрусталиком заполнено т.н. *водянистой влагой*, то есть по сути — водой. Пространство между хрусталиком и сетчаткой заполнено т.н. *стекловидным телом*, которое также является жидкостью, но с большей вязкостью, подобной вязкости желатина. Давление обеих жидкостей слегка повышено относительно атмосферного, дабы обеспечить постоянство формы глазного яблока и избежать нежелательного дрожания изображения на сетчатке. Упругость глазного яблока обеспечивает его устойчивость к механическим повреждениям, поскольку намного труднее разрушить структуру, которая легко поддается силовому воздействию, нежели ту, которая пытается оставаться твердой. Поскольку коэффициенты преломления жидкостей внутри глаза примерно равны коэффициенту преломления воды, а у роговицы и хрусталика они слегка выше, то задняя поверхность роговицы и хрусталик имеют относительно низкую оптическую силу.

Радужная оболочка

Радужная оболочка (радужка) представляет собой сфинктер (циркулярную мышцу. — *Прим. пер.*), управляющий размером зрачка. Радужка пигментирована, благодаря чему у каждого из нас цвет глаз индивидуален и определяется концентрацией и распространенностью меланина внутри радужной оболочки.

Зрачок представляет собой отверстие в центре радужки, через которое освещается сетчатка. Диаметр зрачка во многом зависит от уровня освещенности, но важно отметить, что он может меняться и по «невизуальным» причинам, на-

пример при возбуждении (данный эффект можно наблюдать, следя за зрачками котенка и подергивая игрушкой перед его мордочкой). Таким образом, результирующий диаметр зрачка при том или ином уровне превалирующего освещения предсказать довольно сложно. На практике диаметр зрачка колеблется в пределах 3–7 мм, и площадь зрачка может меняться в среднем пятикратно, в результате чего пятикратно может меняться освещенность сетчатки. Реакция зрачка ограничена эффектом Стайлса-Кроуфорда, суть которого заключается в том, что краевые лучи слабее стимулируют визуальный колбочковый ответ, нежели лучи центральные. Но одним только изменением диаметра зрачка невозможно объяснить великолепную адаптацию человеческого зрения к разным уровням освещенности, которые могут меняться в очень широком диапазоне — вплоть до 10 порядков.

Сетчатка

Сетчатка — это слой клеток, толщиной примерно с папиросную бумагу, расположенный на задней внутренней поверхности глазного яблока и включающий в себя, наряду с другими, светочувствительные клетки.

Оптическое изображение, сформированное глазом, проектируется на сетчатку, которая обеспечивает начальную обработку сигнала и формирует «схему» его передачи (в высшие отделы головного мозга. — *Прим. пер.*). Светочувствительные клетки, или фоторецепторы, это фрагмент центральной нервной системы, которые можно рассматривать как часть головного мозга.

Фоторецепторы — *палочки* и *колбочки* — служат для того, чтобы преобразовывать информацию, представленную в оптическом изображении, в химические и электрические сигналы, которые затем могут быть переданы вышестоящим узлам зрительной системы. Эти сигналы обрабатываются сетью нервных клеток сетчатки, а затем передаются в мозг по зрительному нерву. Подробнее о сетчатке мы будем говорить ниже.

Позади сетчатки находится т.н. *пигментный эпителий* — темный пигментный слой, который обеспечивает абсорбцию любого света, прошедшего через сетчатку, но не поглощенного фоторецепторами, т.е. функция пигментного эпителия состоит в том, чтобы предотвращать обратное рассеяние света через сетчатку, снижающее резкость и контраст воспринимаемого изображения.

Ночные животные жертвуют улучшенным качеством изображения ради т.н. тапетума — слоя с высоким коэффициентом отражения, который отдает свет обратно, давая фоторецепторам еще один шанс абсорбировать энергию. Этим объясняется то, почему глаза лисицы, или любого ночного животного, выхваченные из темноты фарами приближающегося автомобиля, воспринимаются как самосветящиеся.

Центральная ямка сетчатки

Наверное самой важной структурной областью сетчатки является ее *центральная ямка (fovea retinae)* — участок сетчатки, в котором мы имеем наилучшее пространственное и цветовое зрение. Когда мы фиксируем на объекте при-

стальный взгляд, или даже просто смотрим на него, мы двигаем головой и глазами так, чтобы изображение объекта попадало на центральную ямку. Когда вы читаете этот текст — вы двигаете глазами, и разные слова попадают на вашу центральную ямку. Чтобы убедиться в том, как быстро снижается пространственная частота восприятия по мере смещения стимулов в сторону от центральной ямки, попытайтесь прочитать предыдущий текст этого параграфа, зафиксировав взгляд на конце данного предложения: очень трудно, почти невозможно читать строки текста, расположенные вдали от точки фиксации взгляда.

Центральная ямка занимает область с визуальным угловым размером, равным примерно 2° в центре поля зрения. Для того чтобы представить себе, как выглядят 2° визуального угла, посмотрите на кисть вытянутой руки — толщина ногтя большого пальца будет равна примерно 1° визуального угла.

Макула

Центральная ямка защищена желтым фильтром, называемым *макула* (желтое пятно), который защищает ее от воздействия интенсивного коротковолнового излучения, а также понижает хроматические аберрации, возникающие из-за того, что коротковолновые изображения большую часть времени находятся не в фокусе. В отличие от хрусталика, макула с возрастом не становится избыточно желтой, однако у разных наблюдателей оптические плотности макулярного пигмента различны, а у отдельных лиц даже обнаруживаются отличия между левым и правым глазами.

Желтые фильтры (хрусталик и макула), через которые мы смотрим на окружающий мир — это главный источник вариабельности цветового зрения у наблюдателей с нормальным цветовым зрением.

Зрительный нерв

Последняя ключевая структура глаза — *зрительный (оптический) нерв*. Оптический нерв состоит из аксонов (исходящих отростков) ганглиозных клеток — клеток верхнего уровня нейронных процессов в сетчатке. Любопытно, что зрительный нерв состоит примерно из одного миллиона волокон, передающих информацию, сгенеренную примерно 130 миллионами фоторецепторов. Таким образом, имеет место явная компрессия визуального сигнала, происходящая *до* до его передачи к более высоким уровням зрительной системы. «Пиксельная карта» зрительных стимулов никогда не поступает на обработку в высшие зрительные отделы мозга, что называется, «один в один» (подробнее этот процесс мы рассмотрим ниже).

В зрительный нерв собирается информация со всего пространства, заполненного фоторецепторами, но в каждом глазу есть небольшая область, в которой не может быть зрительного возбуждения: эта область носит название *слепого пятна*.

Описанные структуры, непосредственно участвуют в формировании и подготовке информации, используемой зрительной системой, — информации, которая в конечном счете проявляет себя цветовым восприятием. Зрачок устанав-

ливает определенный уровень освещенности сетчатки, что оказывает радикальное влияние на цветовое восприятие, работа хрусталика и макулы в качестве желтых фильтров регулирует спектральную чувствительность нашей зрительной системы и ведет к существенным отличиям в цветовом восприятии у разных наблюдателей.

Пространственные структуры сетчатки определяют характер и природу т.н. зрительных полей, свойства которых критичны для цветового восприятия. Нейронные сети сетчатки в целом повторяют общую картину визуального восприятия, но его специфичность не может рассматриваться как проблема простой поточечной обработки изображения. Некоторые из этих важных положений мы будем подробно обсуждать в разделах, посвященных сетчатке, физиологии зрения и его характеристикам.

1.2 СЕТЧАТКА

Рисунок 1.2 демонстрирует послойную структуру сетчатки, которая включает в себя несколько слоев нервных клеток. Первый слой — фоторецепторы (*палочки* и *колбочки*). Вертикальная обработка сигнала идет через слои сетчатки по цепочке и может быть смоделирована путем отслеживания связей клеток друг с другом — фоторецепторов с биполярными клетками, биполярных с ганглиозными (аксоны последних формируют зрительный нерв). На каждом из этих этапов сравниваются и объединяются сигналы от множества фоторецепторов. Так происходит потому, что весь массив фоторецепторов обеспечивает входной сигнал для множества биполярных клеток, а множество биполярных клеток обеспечивает входной сигнал для множества клеток ганглиозных.

Отметим существенную деталь: данная модель обработки сигнала в сетчатке игнорирует два других важных типа клеток, к которым относятся т.н. *горизонтальные клетки*, обеспечивающие латеральные (боковые) связи между фоторецепторами и биполярными клетками, а также т.н. *амакриновые клетки*, обеспечивающие латеральные связи между биполярными и ганглиозными клетками. Рисунок 1.2 демонстрирует лишь малую часть таких взаимосвязей.

Специфическая обработка информации, происходящая в клетках каждого типа, еще мало изучена и поэтому ее описание не входит в задачу данной главы, но важно отметить, что сигналы сетчатки, передаваемые в высшие отделы головного мозга посредством ганглиозных клеток, идут не путем простого поточечного представления рецепторных сигналов, а скорее состоят из их сложных комбинаций.

Чтобы представить себе всю сложность процессов, происходящих в сетчатке, задумаемся о том, что каждый синапс[1] между нервными клетками может эффективно выполнять математические операции (сложение, вычитание, умножение, деление) в совокупности с усилением сигнала, контролем его мощности и нелинейности. Таким образом, сеть клеток внутри сетчатки представляет собой сложнейший «графический компьютер», в котором информация от

[1] Синапс — участок контакта между нервными клетками. — *Прим. пер.*

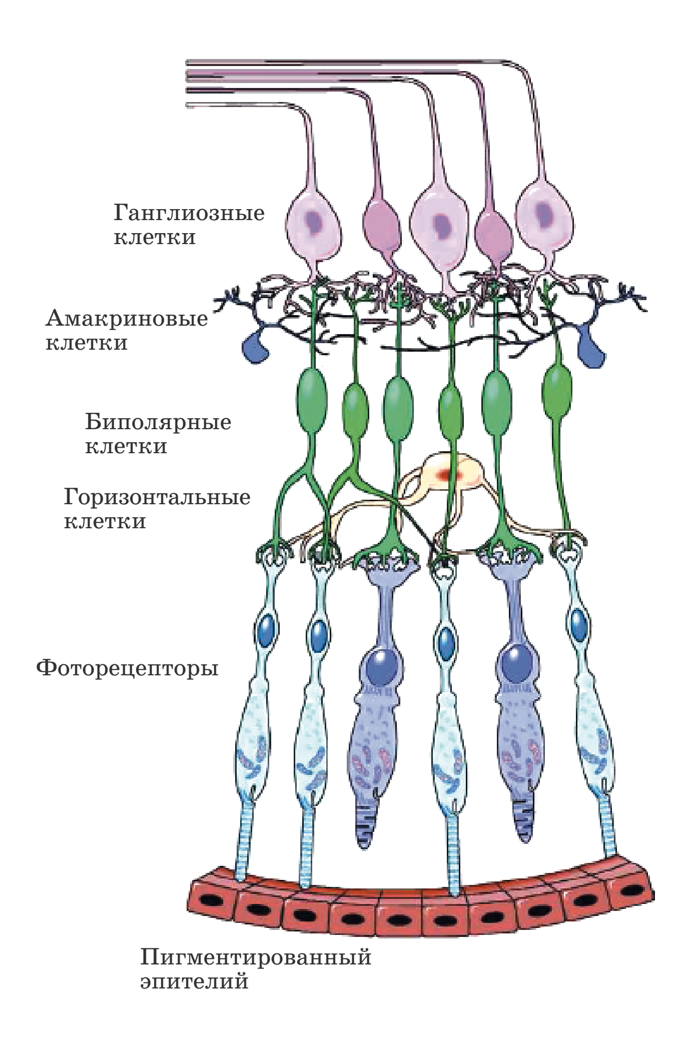


Рис. 1.2 Схема «монтажа» клеток сетчатки человеческого глаза.

130 миллионов фоторецепторов может быть редуцирована примерно в 130 раз, для передачи одному миллиону ганглиозных клеток, при этом без потери визуально значимых данных.

Любопытно, что прежде чем достичь фоторецепторов свет проходит через все нервные структуры сетчатки, но это не оказывает существенного влияния на работу зрения, так как все клетки сетчатки прозрачны и находятся в фиксированном положении, благодаря чему не видны. Большое значение имеет и то, что необходимое питание и удаление отходов, производимых фоторецепторами, осуществляется через заднюю поверхность глаза.

Палочки и колбочки

Рисунок 1.3 демонстрирует фоторецепторы сетчатки двух классов: *палочки* и *колбочки*, которые получили названия благодаря своей форме. Палочки стройны и вытянуты, в то время как периферийные колбочки имеют скорее коническую форму. Морфологическая классификация светочувствительных

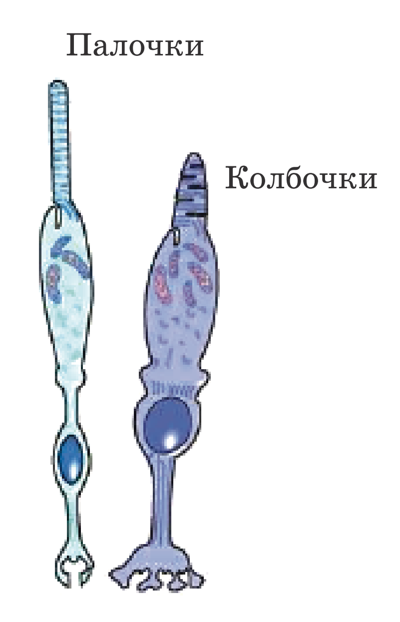


Рис. 1.3 Палочки и колбочки.

клеток сетчатки создает некоторую путаницу, поскольку колбочки центральной ямки плотно упакованы и поэтому внешне схожи с палочками.

Более важным является функциональное отличие между данными типами клеток: при низких уровнях яркости (к примеру, меньших чем 1cd/m^2) зрение обеспечивают только палочки, в то время как колбочки работают при более высоких уровнях яркости. Переход от палочкового зрения к колбочковому — один из механизмов, благодаря которым наше зрение функционирует в большом диапазоне уровней яркости: на высоких уровнях яркости (к примеру, выше чем 100 cd/m^2) палочки полностью насыщаются и функционируют только колбочки. На промежуточных уровнях яркости и палочки и колбочки функционируют совместно. Зрение, при котором активны только палочки, называется *скотопическим зрением*, а зрение, обеспеченное только колбочками, именуется *фотопическим*. Термин *мезопическое зрение* относится к зрению, обеспеченному одновременной активностью палочек и колбочек.

Палочки и колбочки также существенно отличаются друг от друга по своим спектральным чувствительностям — рис. 1.4 (a). Существует только один вид палочковых рецепторов, пик спектральной чувствительности которого нахо-

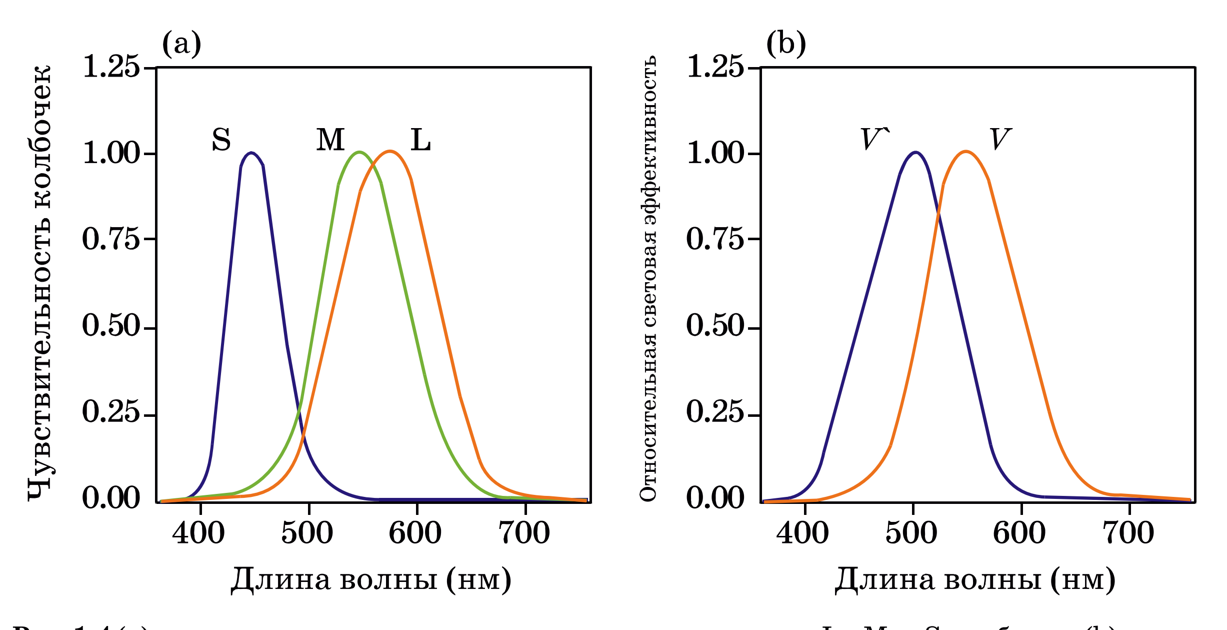


Рис. 1.4 (a) — нормированные спектральные чувствительности L-, M- и S-колбочек; (b) — нормированные CIE-функции спектральной световой эффективности для скотопического — $V`(\lambda)$ — и фотопического —$V(\lambda)$ — зрения.

дится в районе 510 нм, тогда как пики спектральной чувствительности трех видов колбочковых рецепторов приходятся на разные участки видимого спектра.

Три типа колбочек названы как L-, M- и S-колбочки, что отражает их суть: названия даны в соответствии с длинноволновой (Long-wavelength), средневолновой (Middle-wavelength) и коротковолновой (Short-wavelength) чувствительностями колбочек. Иногда колбочки обозначают иными символами: RGB или $\rho\gamma\beta$, наводящими на размышления о красной, зеленой и синей чувствительностях. Как видно из рис. 1.4 (a), такая точка зрения ошибочна и аббревиатура «LMS» является наиболее подходящей. Обращаем внимание на то, что спектральные чувствительности трех типов колбочек накладываются друг на друга. Отметим также, что принцип работы устройств ввода и вывода изображений зачастую весьма далек от принципа «цветоделения» по колбочковым чувствительностям, что является основной причиной крайней затрудненности, а подчас и невозможности точного цветовоспроизведения.

Три типа колбочек напрямую обеспечивают цветовое зрение, палочковая же система, поскольку существует лишь один вид палочек, к цветовому зрению неспособна. В последнем легко убедиться, рассматривая красочную сцену при очень низких уровнях яркости. Рисунок 1.4 (b) демонстрирует две CIE-функции спектральной световой эффективности: функция $V'(\lambda)$ для скотопического (палочкового) зрения и функция $V(\lambda)$ — для фотопического (колбочкового). Эти функции представляют полную чувствительность двух систем в восприятии яркостей на разных длинах волн. Поскольку существует только один вид палочек, функция $V'(\lambda)$ идентична функции спектральной чувствительности палочек и зависит от спектрального поглощения *родопсина* — светочувствительного палочкового пигмента. Функция $V(\lambda)$ представляет собой комбинацию сигналов от трех типов колбочек (а не функцию спектральной чувствительности колбочек какого-либо одного типа).

Теперь обратим внимание на отличие в пиках спектральной чувствительности между скотопическим и фотопическим зрением. Скотопическое зрение более чувствительно к коротким длинам волн. Данный эффект, именуемый *сдвигом Пуркине* (Purkinje shift)[1], можно наблюдать при сравнении двух объектов — синего и красного, которые при дневном свете имеют одинаковую светлоту. Если эти два объекта рассматривать при очень низких уровнях яркости, синий объект будет восприниматься достаточно светлым, в то время как красный, благодаря особенностям функции скотопической спектральной чувствительности, покажется почти черным.

Еще одной важной особенностью трех типов колбочек является их относительное распределение в сетчатке. Оказывается, сетчатка скудно населена S-колбочками, в середине ее центральной ямки они вообще не встречаются; L- и M-колбочек гораздо больше, чем S-колбочек, причем L-колбочек примерно вдвое больше, чем M-колбочек. Количественное соотношение L:M:S пример-

[1] Ян Эвангелиста Пуркине (Jan Evangelista Purkyne) (1787–1869), чешский физиолог, занимавшийся вопросами общей физиологии и физиологии органов чувств. Имя Пуркине часто ошибочно пишут и произносят на французский манер. — *Прим. пер.*

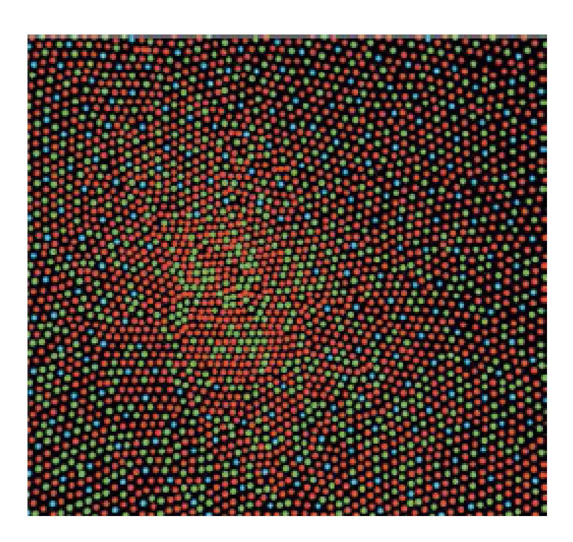


Рис. 1.5 Мозаика ретинальных фоторецепторов, условно раскрашенных для демонстрации относительных пропорций залегания L-колбочек (красные), M-колбочек (зеленые) и S-колбочек (синие) в сетчатке человека. Смоделировано Вильямсом и коллегами (1991).

но равно 12:6:1 (по другим оценкам оно достигает 40:20:1). Чтобы прогнозировать визуальные ответы высокого уровня при объединении колбочковых индивидуальных ответов, необходимо учитывать относительное количественное распределение колбочек в сетчатке — графики рис. 1.4 (а) отражают результат индивидуального нормирования. Рис. 1.5 демонстрирует мозаичную схему гипотетического распределения фовеальных фоторецепторов с условной раскраской L-колбочек в красный, M-колбочек в зеленый, а S-колбочек в синий цвета. Обратим особое внимание на то, что рис. 1.5 — это всего лишь удобная иллюстрация распределения колбочковых популяций, которая не должна восприниматься буквально.

Как видно из рис. 1.5, в центральном пятне нет палочек. Эта особенность зрительной системы проявляет себя тогда, когда пытаются пристально смотреть на маленький тусклосветящийся объект, например на слабую ночную звезду, — как только ее изображение попадает на центральную ямку сетчатки, она исчезает, поскольку в центральной ямке нет палочек, фиксирующих слабые стимулы.

На рис. 1.6 показано распределение палочек и колбочек по всей поверхности сетчатки. Можно проследить ряд важных особенностей этого распределения. Во-первых, отметим невероятно большое количество фоторецепторов: в некоторых областях сетчатки встречается до 150000 фоторецепторов на квадратный миллиметр! Также отметим, что палочек существенно больше (примерно 120 миллионов на сетчатку), чем колбочек (примерно 7 миллионов на сетчатку). Последнее может показаться странным, ведь мы знаем, что колбочки работают при высоких уровнях яркости и обеспечивают высокую степень остроты зрения, тогда как палочки, работающие при низких уровнях яркости, не могут обеспечить достаточную остроту (по аналогии с низкочувствительными и мелкозернистыми фотопленками против высокочувствительных пленок с грубым крупным зерном). На самом деле противоречия нет: каждая отдельная колбоч-

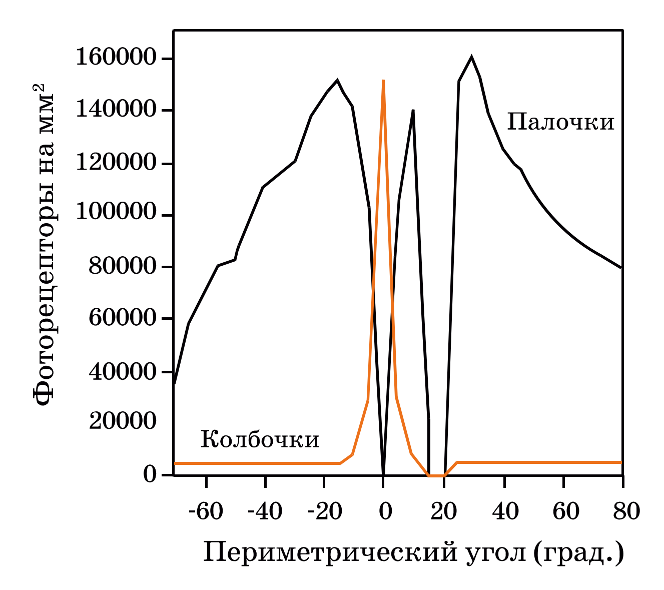


Рис. 1.6 Плотность (рецепторы на кв. мм) палочковых и колбочковых фоторецепторов как функция залегания в сетчатке человека.

ка снабжает сигналами одну ганглиозную клетку, тогда как палочки, посылая сигнал ганглиозной клетке, объединяют ответ от сотен рецепторов, обеспечивая тем самым повышенную чувствительность (но за счет остроты зрения). Сказанное частично объясняет и то, каким образом информация от такого большого количества рецепторов передается через один миллион ганглиозных клеток. Рис. 1.6 иллюстрирует также высокую концентрацию колбочковых рецепторов в центральной ямке. Колбочки крайне редко встречаются в периферийной сетчатке, в то время как в центральной ямке совсем не встречаются палочки. Благодаря отсутствию палочек, в центральной ямке освобождается полезное пространство, используемое для обеспечения высокой остроты зрения при помощи колбочковой системы.

И последняя особенность, которую иллюстрирует рис. 1.6, это *слепое пятно* — область, лежащая на 12–15° латеральнее центральной ямки, в которой начинается зрительный нерв и в которой вследствие этого отсутствуют фоторецепторы. Одна из причин, по которой слепое пятно остается незамечаемым, состоит в том, что оно находится на противоположных сторонах поля зрения в каждом из двух глаз. Однако любопытно, что, когда один глаз закрыт, слепое пятно по-прежнему остается незаметным.

Рис. 1.7 можно использовать для доказательства существования слепого пятна. Чтобы увидеть слепое пятно, закройте левый глаз, а взгляд правого зафиксируйте на кресте рисунка 1.7 (а), затем меняйте расстояние до книжки, пока точка справа от креста не исчезнет, попав на слепое пятно. Обратите внимание на то, что вы видите, когда исчезает точка: вместо темной области появляется участок чистой бумаги — это пример феномена, именуемого *заполнением*: поскольку мозг с данной позиции больше не получает сигнала об изменении зрительного стимула, он заполняет пустоту наиболее вероятным стимулом, в данном случае — однородной белой бумагой. Сила такого заполнения может



Рис. 1.7 Стимулы, используемые для иллюстрации наличия слепого пятна и феномена «заполнения». Закройте левый глаз. Зафиксируйте взгляд правого глаза на кресте и меняйте дистанцию просмотра до тех пор, пока точка (a) или прорезь в линии (b) не упадет на ваше слепое пятно. Обратите внимание на ощущения в каждом случае.

быть проиллюстрирована рис. 1.7 (b), предназначенным для исследования слепого пятна: закройте левый глаз, а взгляд правого зафиксируйте на кресте, затем меняйте расстояние просмотра до тех пор, пока прорезь в линии не исчезнет, то есть пока она не попадет на слепое пятно, — вместо прорези вы будете видеть непрерывную линию, поскольку теперь это наиболее вероятный зрительный стимул. Если вы хотите выполнить эти упражнения, закрыв левый глаз, то просто переверните рисунок вверх ногами, чтобы поймать слепое пятно на другой стороне поля зрения.

Феномен заполнения углубляет наше понимание механизмов работы зрительной системы: сигналы, переданные ганглиозным клеткам, несут информацию только о локальных изменениях в зрительных стимулах, причем действенна лишь информация о пространственных и временны́х переходах (то есть о границах), передаваемая в мозг. Восприятием этот код интерпретируется путем анализа характера изменений и заполняется соответствующим однородным восприятием до поступления сигнала о новом переходе, что обеспечивает гигантскую экономию в полосе пропускания передаваемых сигналов. Можно даже говорить о некоем подобии группового кодирования (сжатия), которое иногда применяется в технологии цифровых изображений.

1.3 ОБРАБОТКА ЗРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА

Процесс нейронной обработки зрительной информации на уровне сетчатки сложен, а на дальнейших стадиях он становится значительно (если не бесконечно) более сложным. Данный раздел — это краткий обзор путей, по которым идет зрительная информация, и имеет смысл начать его с общей карты этих путей.

Оптическое изображение на сетчатке вначале преобразуется в химические и электрические сигналы фоторецепторов, а затем эти сигналы обрабатываются клетками нейронной сети сетчатки (горизонтальными, биполярными, амакриновыми и ганглиозными клетками, описанными выше). Аксоны ганглиозных клеток формируют зрительный нерв, который идет к т.н. *латеральному*

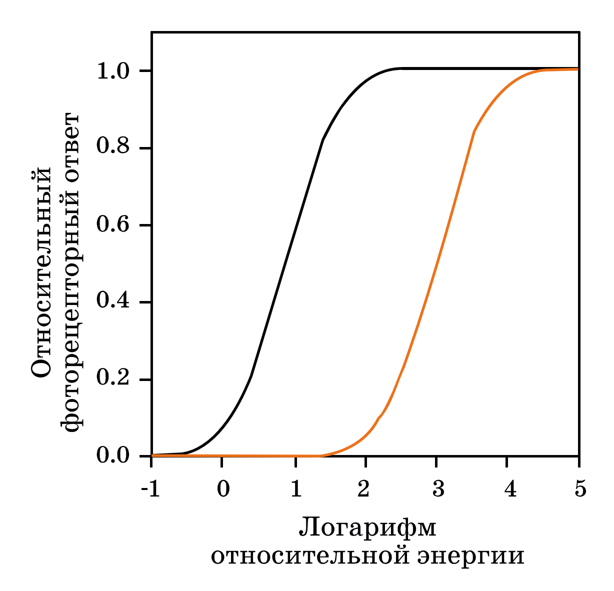


Рис. 1.8 Относительные энергетические ответы палочковых и колбочковых фоторецепторов.

коленчатому телу (lateral geniculate nucleus — LGN) в таламусе[1]. Клетки LGN, получив входной сигнал от ганглиозных клеток, отсылают его в т.н. *первую зрительную область* (V1) затылочных долей коры головного мозга, в которых обработка информации становится невероятно сложной. В коре головного мозга было найдено почти 30 зрительных областей, названные затем как V2, V3, V4, MT и т.д. Сигналы от этих областей отсылаются к некоторым другим областям и обратно. Корковая обработка включает в себя множество стадий: прямую, обратную и латеральную обработки; где-то в недрах этой сети и формируется наше окончательное восприятие. Кое-какие детали этих процессов описаны в следующих параграфах.

Свет, воздействующий на сетчатку, абсорбируется фотопигментом различных фоторецепторов (в палочках, в частности, это *родопсин*). После поглощения фотона родопсин меняет свою структуру, происходит цепная химическая реакция, итогом которой является закрытие ионных каналов в клеточной стенке, продуцирующее электрический сигнал, основанный на разности относительных концентраций различных ионов (к примеру, натриевых и карбонатных) вне и внутри клетки. Аналогичные процессы протекают в колбочках, родопсин которых состоит из *опсина* и *ретиналя*: колбочки всех трех типов имеют сходную фотопигментную структуру, но у колбочковых опсинов («конопсинов») немного разные молекулярные формулы, что ведет к отличиям в спектральной чувствительности колбочек. Каждый тип колбочек (L, M или S) содержит свою форму «конопсина».

На рис. 1.8 показаны относительные ответы фоторецепторов как функция световой экспозиции сетчатки. Любопытно, что характеристики этих функций подобны характеристикам многих устройств ввода и вывода изображений.

---

[1] Таламус — подкорковый отдел головного мозга. Латеральное коленчатое тело — подструктура таламуса. — *Прим. пер.*

В нижней части графика виден порог, ниже которого рецепторы не отвечают. Затем следует более или менее линейный участок кривых, и за ним — финальный участок — зона насыщения (верхний конец кривых). Приведенные кривые описывают рецепторный фототок и демонстрируют самую первую стадию зрительной обработки. В дальнейшем сигналы обрабатываются нейронами сетчатки и синапсами. Результатом этой обработки является преобразованный сигнал, который ганглиозные клетки отправляют по зрительному нерву в мозг.

Рецептивные поля

По ряду причин (таких, как необходимость подавления шумов и обеспечение высокой скорости передачи) амплитудно-модулированные сигналы фоторецепторов конвертируются ганглиозными клетками и вышестоящими отделами мозга в частотно-модулированное представление. Сегодня несомненно то, что величина сигнала от возбужденной нервной клетки представлена количеством пиков напряжения в секунду, а не разностью потенциалов по обе стороны клеточной стенки.

Чтобы получить представление о физиологических свойствах нервных клеток сетчатки, необходимо познакомиться с концепцией т.н. рецептивных полей.

Рецептивное поле фоторецептора — это графическое представление некоей области поля зрения, на которую отвечает данная клетка. На схеме рецептивного поля обычно указывают характер ответа различных областей этого поля (к примеру, положительный ответ, отрицательный ответ, спектральный сдвиг). Фактически рецептивное поле фоторецептора — это маленькая круглая область, указывающая размер и местоположение персональной чувствительности данного рецептора (в поле зрения).

На рис. 1.9 показаны некоторые варианты рецептивных полей ганглиозных клеток, иллюстрирующие антагонизм центра и окружения, характерный для данного уровня зрительной обработки. Рецептивное поле на рис. 1.9 (a) иллюстрирует положительный центральный ответ на положительный входной сигнал от единичной колбочки: положительный ответ окружен т.н. отрицательным ответом окружения, который, как правило, запускается отрицательным входным сигналом от соседних колбочек. Таким образом, ответ от данной ганг-

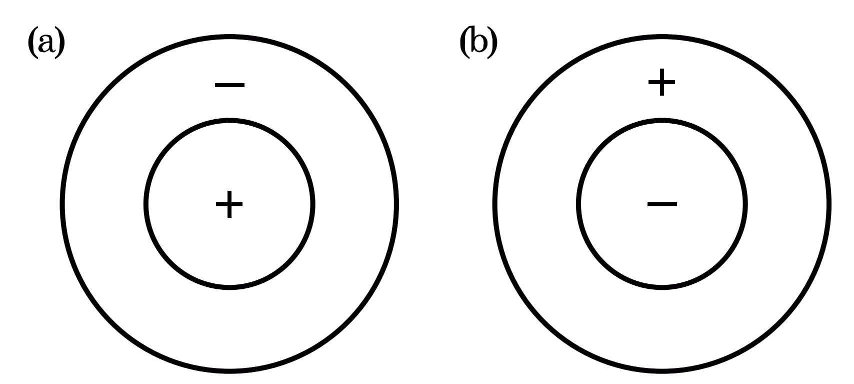


Рис. 1.9 Типичные антагонистичные рецептивные поля «центр — окружение»: (a) — центральное; (b) периферийное.

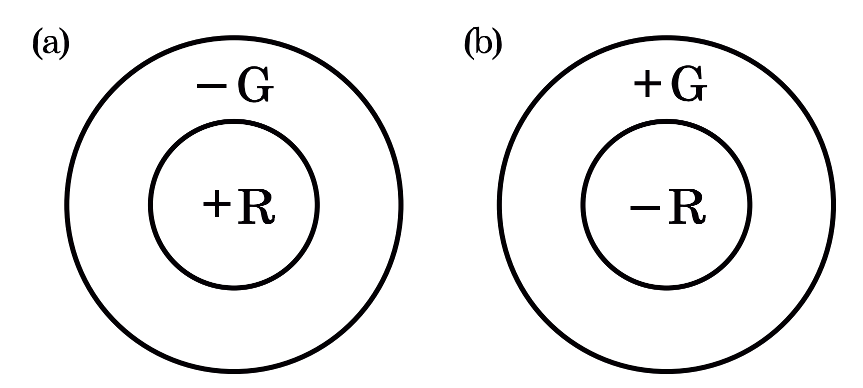


Рис. 1.10 Примеры красно-зеленых (a) и зелено-красных (b) спектрально и пространственно антагонистичных рецептивных полей.

лиозной клетки задается совокупностью положительных и отрицательных входных сигналов от множества колбочек, в результате чего ганглиозная клетка не просто отвечает на точечный свет, но выступает в роли т.н. краевого датчика (фактически — датчика «пятен»). Читатели, знакомые с цифровой обработкой изображений, могут провести аналогию между ответом ганглиозной клетки и результатом операции свертки с заданным ядром, применяемой для обнаружения края.

На рис. 1.9 (b) показано, что ответы с противоположными полярностями равновероятны: ответ, показанный на рис. 1.9 (a), рассматривают как ответ центральной ганглиозной клетки, тогда как ответ, показанный на рис. 1.9 (b), — называют ответом периферийной ганглиозной клетки. Зачастую центральные и периферийные клетки имеют одну и ту же пространственную локализацию, питаемую одними и теми же фоторецепторами, в результате чего повышается динамический диапазон системы.

Отметим, что ганглиозные клетки, показанные на рис. 1.9, не будут выдавать ответ на однородные поля (то есть тогда, когда положительные и отрицательные сигналы сбалансированы). Сказанное выше иллюстрирует один из аспектов компрессии изображения, выполняемого сетчаткой, благодаря которому головной мозг не перегружается избыточной информацией — передаются данные лишь об изменениях в окружающем мире. Отметим, что пространственная обработка информации в зрительной системе — это базис влияния фона на цветовое восприятие.

Рис. 1.9 иллюстрирует пространственную оппонентность ответов ганглиозных клеток, а на рис. 1.10 показано, что в дополнение к пространственной оппонентности к ответам ганглиозных клеток часто прибавляется спектральная оппонентность. На рис. 1.10 (a) показан красно-зеленый оппонентный ответ в центре, питаемый положительным сигналом от L-колбочки, при этом окружение питаемо отрицательным сигналом от M-колбочек. На рис. 1.10 (b) показана периферийная версия данной клетки. Таким образом, прежде чем зрительная информация покинет сетчатку, происходит ее обработка, радикально влияющая на цветовое восприятие. Рисунки 1.9 и 1.10 демонстрируют типичные рецептивные поля ганглиозных клеток, и хотя существует множество

иных типов и вариантов ответа ганглиозных клеток, все они работают по сходным принципам.

На пути к первичной зрительной коре сигналы проходят через латеральное коленчатое тело (LGN). Аксоны ганглиозных клеток заканчиваются в LGN, создавая с его клетками синапсы, что обеспечивает непосредственный («один в один») обмен информацией между ганглиозными и LGN-клетками. Таким образом, рецептивные поля LGN-клеток идентичны таковым у ганглиозных клеток. Возможно, LGN действует только как ретранслятор сигналов. Однако вероятно и то, что LGN все же выполняет некую зрительную функцию, принимая на себя нейронные проекции из коры, которые, в свою очередь, могут отвечать за некоторые виды коммутации или за адаптационный механизм обратной связи. Аксоны LGN-клеток подходят к первой зрительной области коры головного мозга (V1).

Обработка в V1-области

В V1-области коры головного мозга кодирование зрительной информации существенно усложняется: подобно тому как исходящие сигналы от различных фоторецепторов сравниваются и объединяются для реализации ответов ганглиозной клетки, выходящие сигналы от LGN-клеток сравниваются и объединяются для производства кортикальных (корковых) ответов. Когда сигналы попадают в цепь кортикальной обработки, эта обработка повторяется несколько раз с резко возрастающим уровнем сложности, и в итоге рецептивные поля начинают терять свое значение.

В V1 встречаются клетки, которые отвечают лишь на стимулы определенного вида, например:

— края и полоски различной ориентации;
— вход от одного глаза, второго и обоих глаз;
— различные пространственные частоты;
— различные временны́е частоты;
— специфические пространственные местоположения;
— комбинации перечисленных стимулов.

Кроме того, обнаруживаются клетки, которые линейно комбинируют сигналы от клеток LGN (и от прочих клеток с нелинейным суммированием).

Все варианты ответов необходимы для восприятия размера, формы, местоположения, движения, интенсивности и цвета. Учитывая сложность кортикальных ответов в клетках V1, нетрудно представить себе, до какой степени сложны зрительные ответы, получаемые из сети, состоящей примерно из 30 зрительных областей.

На рис. 1.11 показана схема малой доли связей между различными известными кортикальными областями. Отметим, что рис. 1.11 демонстрирует связи именно между областями, но не между клетками: при этом существует примерно 109 нейронов коры, выполняющих персональные зрительные функции, деятельность которых очень сложно объяснить простыми словами. Однако функция отдельной клетки, как правило, не имеет значения, поскольку раз-

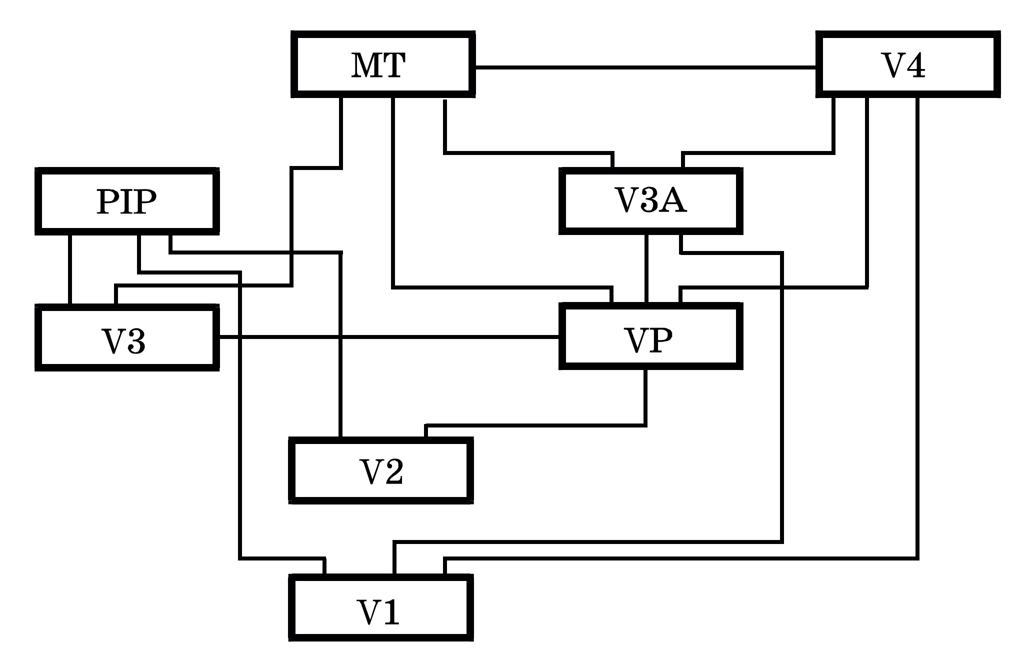


Рис. 1.11 Фрагментарная диаграмма, иллюстрирующая многопоточность обработки визуальной информации в зрительной коре головного мозга. Информация может передаваться по каждой связи в обоих направлениях.

личные виды восприятия распространяются на целые пакеты клеток, разбросанных по всей коре головного мозга.

Более мы не будем говорить о физиологии и в следующих разделах опишем лишь некоторые общие перцепционные и психофизические свойства зрительной системы, что поможет нам глубже понять механизм ее работы.

1.4 МЕХАНИЗМЫ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ

В истории нашей науки было много теорий, пытавшихся объяснить механизмы цветового зрения. Краткий обзор некоторых наиболее современных концепций поможет разобраться в концепции текущей.

Трихроматическая теория

В конце XIX-го века была разработана т.н. трихроматическая теория цветового зрения, основанная на трудах Максвелла, Юнга и Гельмгольца, которые догадывались о существовании трех типов рецепторов, чувствительных к лучам примерно красной, примерно зеленой и примерно синей областей спектра. Трихроматическая теория предполагала, что три вида рецепторов формируют три изображения окружающего мира, которые затем передаются в мозг, где соотношения сигналов каждого изображения сравниваются, на основании чего и возникает цветовое ощущение. Трихроматическая (трехрецепторная) природа цветового зрения не вызывала сомнений, но идея трех изображений, посылаемых в мозг, оказалась несостоятельной и не смогла объяснить ряд зрительных феноменов.



Рис. 1.12 Стимулы, предназначенные для демонстрации оппонентных постобразов. Зафиксируйте взгляд на черной точке в месте стыковки четырех окрашенных квадратов. Через 30 секунд переместите и зафиксируйте взгляд на черной точке равномерного белого поля. Обратите внимание на цвета возникших постобразов и сравните их с цветами оригинальных стимулов.

Оппонентная теория Геринга

В тот же период Геринг предложил т.н. оппонентную теорию цветового зрения, основанную на множестве субъективных наблюдений за цветовым восприятием. Эти наблюдения включали восприятие цветового тона и симультанного (одновременного) контраста, т.н. постобразы и аномалии цветового зрения. Геринг отметил, что определенные цветовые тона никогда не воспринимаются одновременно, к примеру: цветовое ощущение никогда не описывается как зелено-красное или желто-синее, в то время как комбинации красного с желтым, красного с синим, зеленого с желтым и зеленого с синим воспринимаются легко. Это обстоятельство навело Геринга на мысль, что существует некая фундаментальная причина, по которой цвета в красно-зеленых и желто-синих парах противопоставлены друг другу. Наблюдения касались и симультанного контраста, суть которого в том, что одни и те же объекты, расположенные на красном фоне, воспринимаются чуть более зелеными, на зеленом фоне чуть более красными, на желтом фоне чуть более синими, а на синем фоне чуть более желтыми.

Рис. 1.12 иллюстрирует оппонентную природу визуальных постобразов. Постобраз от красного стимула будет зеленым, от зеленого — красным, от желтого — синим и от синего — желтым (отметим, что постобразы легко объяснить и в логике комплементарных [дополнительных] цветов как следствие адаптации трихроматической системы). Обосновывая оппонентную теорию, Геринг упомянул лишь о светло-темных постобразах, но при этом ничего не сказал о хроматических). Наконец, Геринг заметил, что лица, страдающие аномалия-

ми цветового зрения, теряют способность различать цветовые тона в красно-зеленых и желто-синих парах.

Наблюдения Геринга ведут нас к пониманию механизма обработки цветовой информации зрительной системой. Геринг тоже предполагал существование трех типов рецепторов, но считал, что они работают по принципу биполярного ответа на светлый-темный, красный-зеленый и желтый-синий. В то время такое утверждение казалось физиологически абсурдным, и оппонентная теория Геринга не получила признания.

Современная теория оппонентных цветов

В середине XX-го века оппонентная теория возродилась, поскольку стали появляться подтверждающие ее экспериментальные данные, к примеру: Свэтичин (1956) обнаружил оппонентные сигналы при электрофизиологических измерениях ответов в сетчатке золотой рыбки (которые оказались трихроматическими!), Де`Валойс с коллегами (1958) обнаружил подобные оппонентные физиологические ответы в LGN-клетках макаки, Джеймсон и Гурвич (1955) представили количественные психофизические данные, полученные на основе т.н. безоттеночных экспериментов с людьми. Эксперименты Джеймсона и Гурвича позволили измерить относительные спектральные чувствительности оппонентных путей. Все эти данные, объединенные с огромным количеством дополнительных исследований, привели к развитию современной оппонентной теории цветового зрения, которую иногда называют стадийной теорией (см. рис. 1.13).

Рис. 1.13 демонстрирует, что на первой стадии цветового зрения рецепторы, как и предполагали Максвелл, Юнг и Гельмгольц, действительно трихроматические. Однако вопреки простой трихроматической теории три «цветоделенных» изображения не передаются непосредственно в мозг: вместо этого нейроны сетчатки (и возможно, более высокие отделы зрительной системы) кодируют цвет через оппонентные сигналы. Выходные сигналы от всех трех типов колбочек суммируются (L+M+S) с целью получения ахроматического ответа, который до тех пор соответствует кривой CIE V(λ), пока суммация берется в пропорции к относительной заселенности сетчатки тремя типами колбочек. Различия в колбочковых сигналах позволяют сконструировать красно-зеленые (L–M+S) и желто-синие (L+M–S) оппонентные сигналы.

Преобразование LMS-сигналов в оппонентные приводит к декорреляции цветовой информации, идущей по трем каналам, тем самым обеспечивая более эффективную передачу сигналов и снижая шумовые помехи. Три оппонентных пути, разумеется, имеют индивидуальные пространственные и временны́е характеристики, очень важные для прогнозирования цветового восприятия (но их мы обсудим в разделе 1.5).

Значимость преобразования трихроматических сигналов в оппонентные отражена в формулировках всех моделей цветового восприятия. В рис. 1.13 включена не только схематическая диаграмма нейронного «телеграфа», который продуцирует оппонентные ответы, но также и относительные спектральные чувствительности оппонентных механизмов до и после оппонентного кодирования.

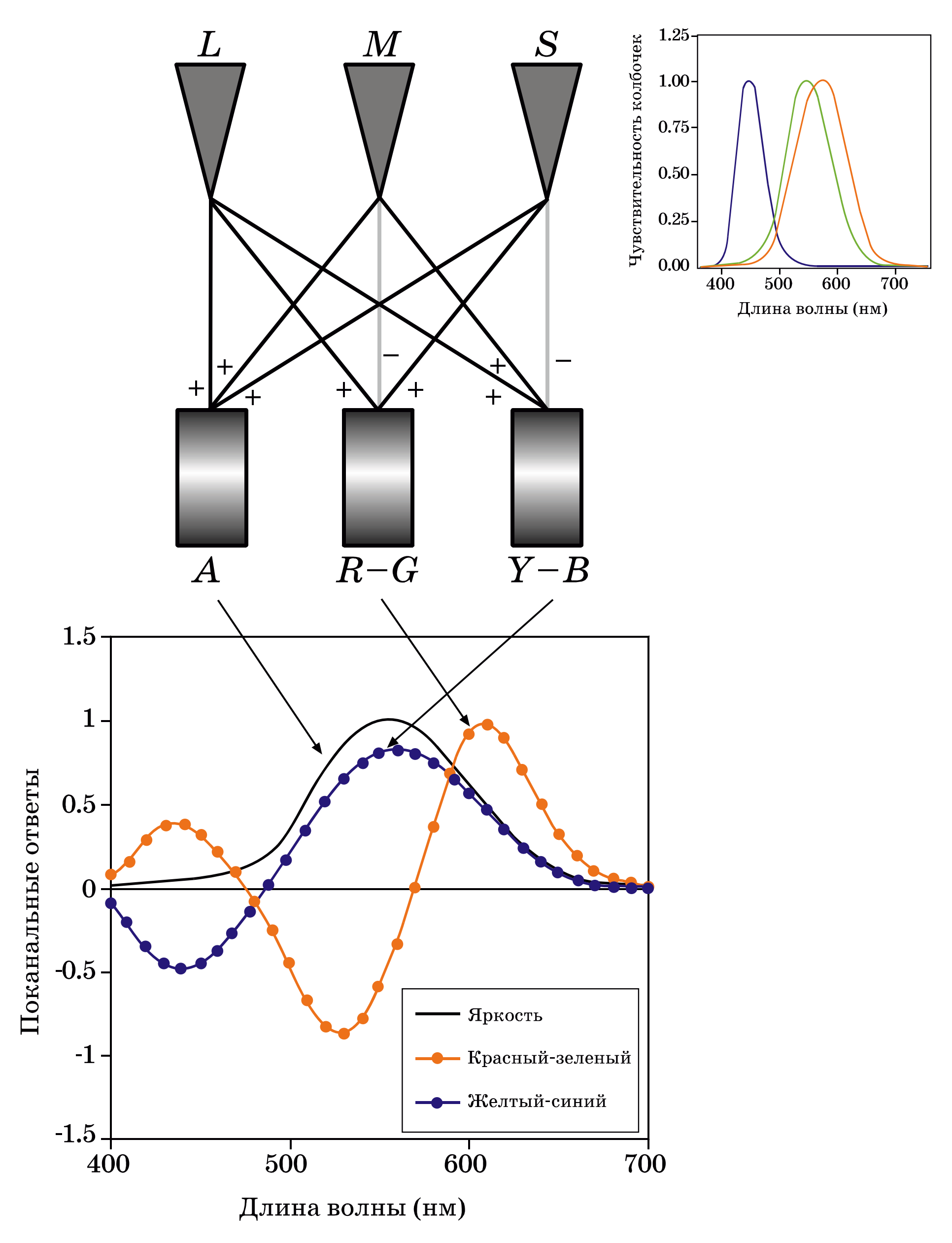


Рис. 1.13 Схематическая иллюстрация кодирования колбочковых сигналов в оппонентные цветовые сигналы в зрительной системе человека.

Механизмы адаптации

Заметим, что было бы неправомерно рассматривать обработку цветовых сигналов человеческой зрительной системой лишь как статическую: необходимо еще разобрать динамические приспособительные механизмы, которые служат оптимизации визуального ответа в тех или иных условиях просмотра, то есть изучить различные виды адаптации.

Для понимания процессов цветового восприятия необходимо рассмотреть механизмы темновой, световой и хроматической адаптаций.

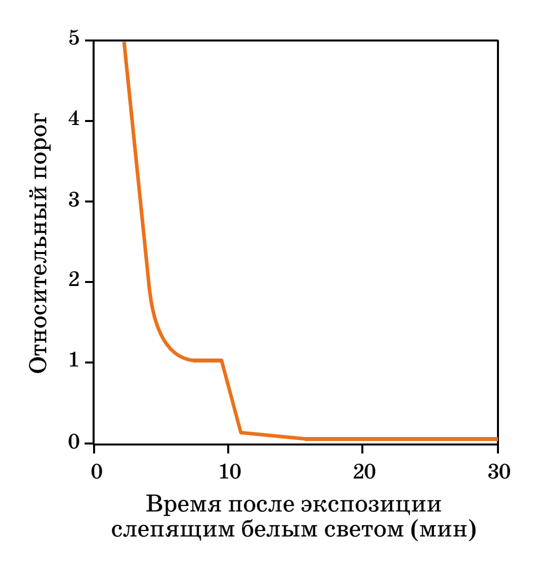


Рис. 1.14 Кривая темновой адаптации, демонстрирующая восстановление порога после экспозиции ярким белым светом. Излом кривой иллюстрирует момент, когда палочки становятся более чувствительными, нежели колбочки.

Темновая адаптация

Темновая адаптация имеет отношение к изменению зрительной чувствительности, возникающему тогда, когда преобладающий уровень освещения понижается, к примеру, когда солнечным днем входят в кинотеатр: вначале он кажется совершенно темным, но спустя несколько минут каждый становится способным ясно различать предметы — проходы, места, зрителей. Так происходит потому, что зрительная система отвечает на недостаток освещения повышением своей чувствительности, становясь способной к адекватному визуальному ответу при низком уровне освещения.

На рис. 1.14 показано восстановление зрительной чувствительности (уменьшение порога) после перехода от чрезвычайно высокого уровня освещения к полной темноте: колбочки постепенно повышают свою чувствительность, пока уровни кривой (по прохождении нескольких минут) не выровняются. Затем, в течение приблизительно 10-ти минут, зрительная чувствительность остается в целом постоянной. На следующем этапе палочковая система, у которой довольно долгий период восстановления, возвращается к достаточной чувствительности, начинает доминировать над колбочками и таким образом берет под свой контроль всю чувствительность зрения. Чувствительность палочек продолжает повышаться в течение примерно 30 минут, точнее, до тех пор пока это повышение еще можно зафиксировать.

Вспомним, что пятикратного увеличения диаметра зрачка недостаточно для того, чтобы обеспечить зрение в большом диапазоне уровней освещения, с которым мы обычно сталкиваемся, и поэтому нейронные механизмы часть адаптации берут на себя.

Механизмы, отвечающие за различные виды адаптации, следующие:

— истощение и регенерация фотопигмента;

— палочково-колбочковый переход;

— контроль усиления в рецепторах и других клетках сетчатки;

— вариативность регионального объединения между рецепторами;

— пространственная и временная оппонентность;

— контроль усиления в оппонентных и других высокоуровневых механизмах;

— нейронный откат;

— компрессия ответа;

— когнитивная интерпретация.

Световая адаптация

Световая адаптация — по существу это процесс, обратный темновой адаптации, который, однако, поскольку его зрительные свойства иные, важно разобрать отдельно. Световая адаптация происходит, когда мы покидаем полумрак кинотеатра и выходим на залитую солнцем улицу: в этом случае зрительная система, дабы обеспечить адекватность восприятия, должна понизить свою чувствительность, поскольку теперь в распоряжении зрения значительно большее количество визуальной энергии.

Световую адаптацию обслуживают те же самые физиологические механизмы, но они ассиметричны в прямой и обратной кинетике: необходимый результат световой адаптации достигается за 5 минут, а не за 30.

Рис. 1.15 демонстрирует ценные свойства световой адаптации. Зрительная система имеет ограниченный динамический диапазон выходных сигналов (скажем, 100:1), определяющий наше восприятие, но в реальных сценах разброс уровней освещения может десятикратно превышать разницу между звездной ночью и солнечным днем (к счастью, почти никогда не возникает необходи-

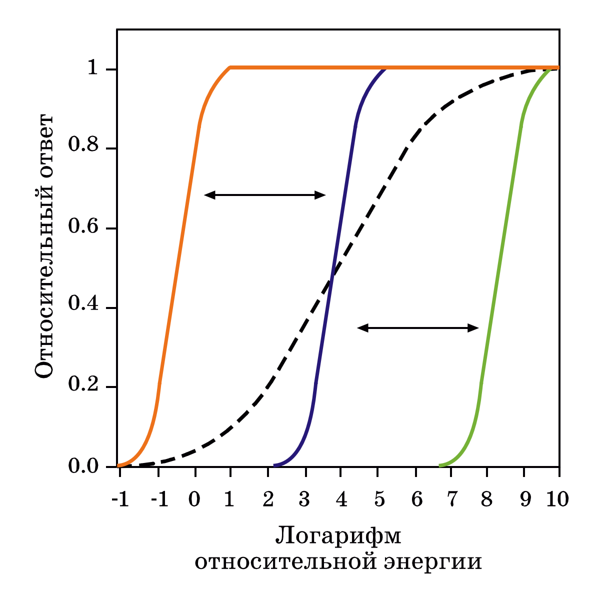


Рис. 1.15 Иллюстрация процесса световой адаптации с помощью масштабирования большого диапазона интенсивностей стимулов в относительно малый динамический диапазон ответов: сплошные кривые демонстрируют семейство адаптационных ответов; пунктирная кривая показывает гипотетический безадаптационный ответ.

мости рассматривать что-либо при полном диапазоне уровней освещения). Если для масштабирования большого диапазона интенсивностей стимулов в выходные сигналы зрительной системы использована единичная функция ответа, то для отдельно взятой сцены будет использован лишь малый диапазон выходных сигналов. Такой ответ показан пунктирной линией на рис. 1.15, и ясно, что при такой функции ответа воспринимаемый контраст какой-либо отдельно взятой сцены будет ограничен и чувствительность зрения к изменениям будет сильно снижена из-за проблемы «полезный сигнал/шум». С другой стороны, световая адаптация служит созданию целого семейства кривых зрительного ответа, что на рис. 1.15 демонстрируется сплошными линиями. Эти кривые масштабируют используемый диапазон освещенностей отдельно взятой сцены в полный динамический диапазон зрительного ответа, что оптимизирует визуальное восприятие в той или иной ситуации.

О световой адаптации можно говорить как о процессе скольжения кривой зрительного ответа вдоль оси уровней освещения (рис. 1.15), которое длится до тех пор, пока не будет достигнут оптимальный уровень для данных условий просмотра.

Световая и темновая адаптации в целом аналогичны автоматическому контролю экспозиции в фотографических системах.

Хроматическая адаптация

Третий тип адаптации, тесно связанный с двумя предыдущими, — *адаптация хроматическая*. Полагают, что за хроматическую адаптацию отвечают физиологические механизмы, сходные с вышеописанными механизмами световой и темновой адаптаций. Хроматическая адаптация — это во многом независимое управление чувствительностью трех механизмов цветового зрения, что схематично иллюстрирует рис. 1.16: мы видим, что полная высота каждой

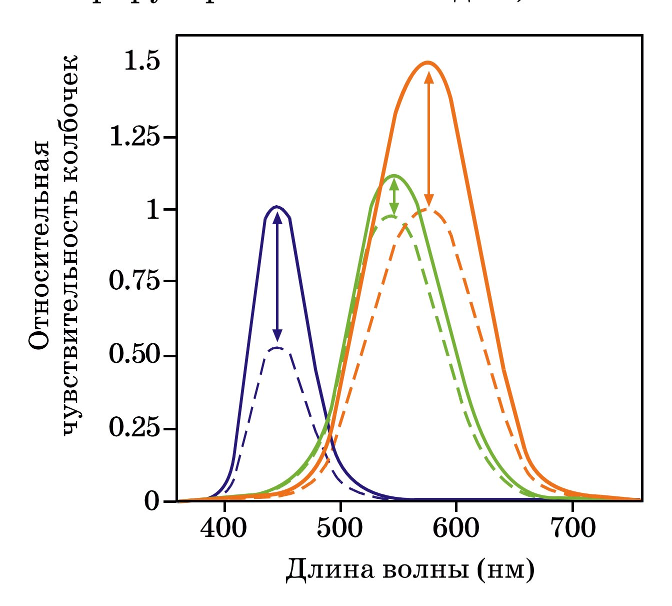


Рис. 1.16 Схематичная иллюстрация процесса хроматической адаптации как независимой регулировки чувствительности трех типов колбочек.



Рис. 1.17 Пример сетчаточно-локализованной хроматической адаптации. На 30 секунд зафиксируйте взгляд на черной точке между голубой и желтой областями, а затем переведите взгляд на белую точку в центре нижнего изображения. Обратите внимание на то, что после адаптации нижнее изображение начинает восприниматься однородным.
Оригинал взят с Kodak Photo Sampler PhotoCD.

из трех кривых спектральной чувствительности колбочек может меняться самостоятельно, но, несмотря на то, что хроматическую адаптацию чаще всего толкуют и моделируют как независимый контроль чувствительности колбочек, нет никаких оснований полагать, что за хроматическую адаптацию не отвечают оппонентные и прочие цветовые механизмы.

Хроматическую адаптацию можно наблюдать при рассматривании белого объекта при разных вариантах освещения (например, листа бумаги при дневном освещении, флуоресцентном или при свете ламп накаливания). Дневной свет содержит относительно большее количество коротковолновой энергии, чем свет флуоресцентный, а свет ламп накаливания относительно большее количество длинноволновой энергии, чем свет флуоресцентных ламп, — однако в целом бумага воспринимается белой под всеми этими источниками. Так происходит потому, что S-колбочковая система становится относительно менее

чувствительной под дневным светом, дабы компенсировать дополнительную коротковолновую энергию, а L-колбочковая система становится относительно менее чувствительной при свете ламп накаливания, дабы компенсировать дополнительную длинноволновую энергию. О хроматической адаптации можно говорить как об аналогии с автоматическим балансом белого в видеокамерах.

Рис. 1.17 демонстрирует хроматическую адаптацию: половины поля зрения на иллюстрации организованы так, что задают уровни хроматической адаптации, несовместимые между собой.

Учитывая фундаментальную важность хроматической адаптации в моделировании цветового восприятия, она подробнее будет описана в главе 8.

Механизмы зрения, влияющие на цветовое восприятие

Существует ряд важных когнитивных механизмов зрения, влияющих на цветовое восприятие: цветовая память, цветовая константность, распознавание объектов и т.н. когнитивное обесцвечивание осветителя (discounting the color of an illuminant). Детально они описаны в главах 6–8.

Цветовая память относится к феномену, суть которого в том, что распознаваемые объекты имеют некий прототип цвета, связанного с этими объектами, к примеру: большинство людей помнят типичный цвет зеленой травы и в экспериментальных условиях могут воссоздать стимул этого цвета, если таковое потребуется. Любопытно, что цветовая память зачастую искажена в отношении конкретных объектов: все та же зеленая трава и синее небо, как правило, помнятся более насыщенными, нежели их фактические стимулы.

Цветовая константность относится к повседневному восприятию, при котором цвета объектов остаются неизменными даже при существенных изменениях в цвете освещения и уровне яркости. Цветовая константность обеспечивается механизмами хроматической адаптации и памятными цветами, но при тщательном наблюдении можно показать, что она очень слаба.

Распознавание объектов — это общая реакция на пространственные, временные и светлотно-темновые свойства объектов, но не на их хроматические свойства (Давыдов, 1991).

Когнитивное обесцвечивание осветителя относится к способности наблюдателя автоматически интерпретировать условия освещения и воспринимать цвета объектов после ментальной нивелировки цвета источника освещения.

Таким образом, как только объекты оказываются распознанными, механизмы цветовой памяти и когнитивного обесцвечивания осветителя могут присвоить им соответствующий цвет. Эти механизмы имеют радикальное влияние на цветовое восприятие и становятся критически важными, когда выполняется цветовое сравнение на разных носителях.

Понятно, что обработка визуальной информации чрезвычайно сложна и полностью еще не изучена (и не факт, что будет изучена), но в то же время интересно попытаться проследить повышение сложности корковых зрительных ответов по мере прохождения сигнала по зрительной системе.

Электрофизиологические исследования единичных клеток помогли обнаружить кортикальные клетки с чрезвычайно сложной реакцией на стимулы,

к примеру: у обезьян были обнаружены клетки, отвечающие только на изображение обезьяньих лап или мордочек. Существование таких клеток ставит вопрос: до какой степени сложен ответ от одной клетки? Очевидно, что для каждого вида восприятия не существует персональной клетки, поэтому в какой-то момент в зрительной системе восприятие строится на комбинациях различных сигналов, обеспечивающих различные виды восприятия. Такое построение дает возможность инвариантности восприятия, в частности — цветового. Очевидно, что на цветовое восприятие влияет большое число вариаций стимула и что наша зрительная система часто «экспериментирует» с ними.

1.5 ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ СВОЙСТВА ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ

Исследование зрительного опыта не может быть изолированным. Цветовое восприятие стимула зависит от пространственных и временны́х характеристик этого стимула: к примеру, черно-белый стимул, мерцающий с определенной частотой, может восприниматься весьма красочным.

Пространственные и временны́е характеристики человеческой зрительной системы обычно исследуют через измерение т.н. *контрастно-сенситивных функций*. Контрастно-сенситивные функции (CSF) в науке о зрении аналогичны модуляционно-трансферным функциям (MTF) в науке об изображениях, однако CSF нельзя приравнивать к MTF, поскольку, во-первых, человеческая зрительная система крайне нелинейна, и во-вторых, CSF представляют пороговую чувствительность, а не надпороговую модуляцию.

Контрастно-сенситивная функция определяется порогом ответа на контраст (чувствительность обратна порогу) как функция пространственной или временно́й частоты. О контрасте обычно говорят как об отношении разности между максимальной и минимальной яркостями стимула к их сумме. CSF как правило измеряются с использованием стимулов, интенсивность которых синусоидально меняется в пространстве и времени, поэтому однородный образец имеет нулевой контраст, а неравномерные образцы, в которых яркость некоторых участков падает до ноля, имеют контраст равный 1.0 независимо от того, какова их общая яркость.

Рис. 1.18 схематично иллюстрирует типичные контрастно-сенситивные функции яркостного (черно-белый стимул) и хроматического (красно-зеленый и желто-синий стимулы при постоянной яркости) контрастов. Яркостная контрастно-сенситивная функция имеет полосно-пропускающий характер с пиком чувствительности в районе 5 полос на градус и приближается к нолю при отсутствии полос, иллюстрируя тем самым тенденцию зрительной системы к нечувствительности в отношении однородных полей. Функция также стремится к нолю начиная с частоты примерно в 60 полос на градус — с этого момента детали уже не могут быть распознаны оптикой глаза или мозаикой фоторецепторов. Полосно-пропускающая контрастно-сенситивная функция коррелирует с концепцией центра-окружения антагонистичных рецептивных полей, кото-

рые максимально чувствительны к промежуточным значениям пространственной частоты.

Хроматические механизмы имеют низкую частоту пропускания и значительно меньшие граничные частоты, что затрудняет использование хроматической информации о тонких деталях (высоких пространственных частотах). Последнее на руку системам кодирования изображений и схемам их сжатия (к примеру, NTSC или JPEG).

Низкочастотные характеристики хроматических механизмов указывают и на то, что краевая детекция/усиление не проходят по данной частотной категории восприятия: сине-желтая хроматическая CSF имеет меньшую граничную частоту, нежели красно-зеленая CSF вследствие нехватки в сетчатке S-колбочек. Отметим также, что яркостная CSF ощутимо выше, нежели обе хроматические, что указывает на большую чувствительность зрительной системы к малейшим изменениям в яркостном контрасте, нежели в контрасте хроматическом. Пространственные яркостная и хроматическая CSF не участвуют непосредственно в цветовом восприятии, хотя и оказывают на него существенное влияние. Жанг и Ванделл в 1996 г. опубликовали интересную методику внедрения этих типов ответов в вычисление цветового пространства CIELAB, а Джонсон и Фершильд (2003) предложили новейшую версию данной модели.

Рис. 1.19 иллюстрирует пространственные свойства цветового зрения и пространственный анализ типичного изображения. На рис. 1.19 (a) показан оригинал. Яркостная информация представлена отдельно на рис. 1.19 (b). Остаточная хроматическая информация представлена отдельно на рис. 1.19 (c). Очевидно, что гораздо больше пространственных деталей может быть визуально получено из яркостного изображения нежели из остаточного хроматического: на рис. 1.19 (d) показано изображение, восстановленное с использованием яр-

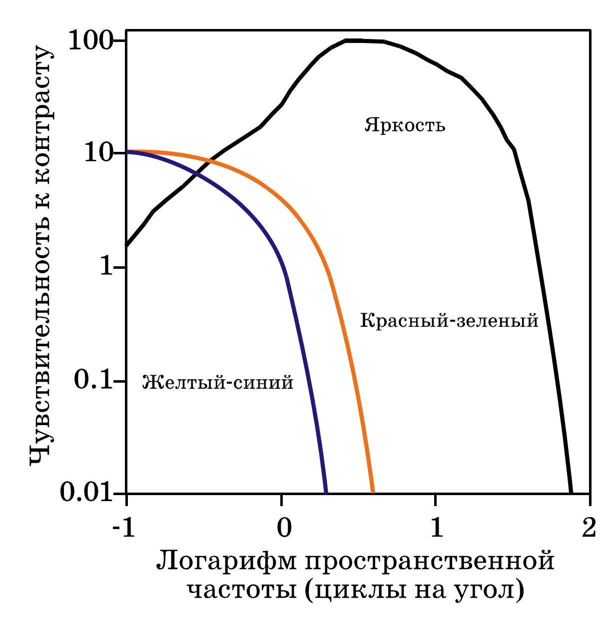


Рис. 1.18 Пространственные контрастно-сенситивные функции яркостного и хроматического контрастов.



Рис. 1.19 Иллюстрация пространственных свойств цветового зрения: (a) оригинальное изображение; (b) только яркостная информация; (c) только хроматическая информация; (d) реконструкция изображения за счет объединения яркостной информации полного разрешения с хроматической информацией, подвергнутой субсэмплингу с коэффициентом 4.
Оригинал взят с Kodak Photo Sampler PhotoCD.

костного изображения полного разрешения, объединенного с хроматическим изображением, подвергнутым субссэмплингу с коэффициентом 4. Такой способ сжатия изображения не вызывает потерь в восприятии деталей или цветовом восприятии.

Рис. 1.20 схематично иллюстрирует типичные временны́е контрастно-сенситивные функции (для яркостного и хроматического контрастов), которые имеют много общего с пространственными CSF, показанными на рис. 1.18. И вновь яркостные временны́е CSF выше по чувствительности и граничной частоте, чем хроматические временны́е CSF, что демонстрируют их полосно-пропускные характеристики. Временны́е CSF (так же как и пространственные) непосредственно не включены в модели цветового восприятия, но их важно учитывать, когда идет просмотр движущихся изображений (таких, как цифровые видеоклипы), которые могут воспроизводиться с различной экранной частотой. Важно понимать, что функции, показанные на рис. 1.18 и 1.20, типичны, но не универсальны.

Как уже было сказано, разные виды исследования человеческого зрительного восприятия не могут проводиться изолированно, поскольку пространственные и временны́е CSF взаимодействуют друг с другом. Пространственная CSF, измеренная при различных временны́х частотах, окажется чрезвычайно изменчивой, и то же справедливо в отношении временно́й CSF, измеренной при различных пространственных частотах. Эти функции также зависят от иных вариативных факторов, таких, как уровень яркости, размер стимула, ретинальный локус. Подробности по данным взаимодействиям см. у Келли (1994).

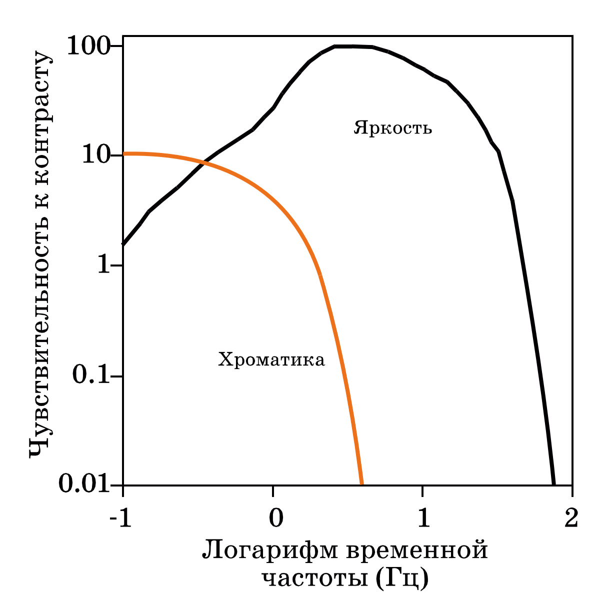


Рис. 1.20 Временны́е контрастно-сенситивные функции яркостного и хроматического контрастов.

Эффект наклона

Интересным феноменом пространственного зрения является т.н. *эффект наклона*, который состоит в том, что при восприятии решеток, ориентированных под углом 0° и 90° (относительно линии, соединяющей глаза), острота зрения выше, чем при восприятии решеток, ориентированных под углом 45°. Данный феномен наблюдают при создании наклонных полутоновых растров, которые устанавливают так, чтобы наиболее заметные элементы были наклонены под углом 45°. Этот эффект можно проследить, если взять черно-белое полутоновое газетное изображение и менять дистанцию просмотра до тех пор, пока растровые точки не станут едва заметными. Если изображение зафиксировать на этом расстоянии, а затем повернуть на 45°, растровые точки станут четко различимыми (поскольку окажутся сориентированными под углом 0° или 90°).

CSF и движения глаза

Пространственные и временны́е CSF тесно связаны с движением глаз: статический пространственный образец становится динамическим, когда взгляд наблюдателя начинает скользить по стимулу. Отметим, что и пространственная, и временна́я яркостные CSF стремятся к нулю, когда к нулю стремится соответствующая частота, и из этого следует, что полностью статичный стимул невидим. В самом деле, если зафиксировать изображение на сетчатке с помощью специальной видеосистемы, закрепленной на глазном яблоке, то восприятие стимула исчезает через несколько секунд (Келли, 1994). Иногда это явление можно наблюдать, тщательно зафиксировав взгляд на каком-либо предмете, — через несколько секунд периферийные объекты начинают исчезать (центральный объект при этом не исчезает, поскольку колебания даже сознательно удерживаемого глаза все же больше, чем пространственная частота центральной

ямки сетчатки). Чтобы избежать этого неприятного эффекта, наши глаза постоянно двигаются, то есть выраженные движения глаз необходимы для того, чтобы видеть различные области в поле зрения при высоком пространственном разрешении центральной ямки. Наряду с этим существуют мелкие глазные движения (т.н. тремор глаз. — *Прим. пер.*), обеспечивающие комфортное зрительное восприятие окружающего мира. Сказанное выше объясняет то, почему тени от ретинальных клеток и кровеносные сосуды обычно невидимы — они двигаются не *по* сетчатке, а *вместе* с сетчаткой.

Глазные движения через суммарную экспозицию разных областей сетчатки оказывают существенное влияние на адаптацию и восприятие и необходимы для сохранения визуального контраста. Новейшие технические достижения позволили провести психофизические исследования данного эффекта (к примеру, Бабкок и др. 2003).

1.6 АНОМАЛИИ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ

Существуют различные виды врожденных и приобретенных аномалий цветового зрения. Краткий, но всесторонний обзор данной темы предлагают Кайзер и Бойнтон (1996), мы же в данном разделе остановимся лишь на основных врожденных аномалиях.

Протанопия, дейтеранопия и тританопия

Некоторые аномалии цветового зрения вызваны недостатком специфического колбочкового фотопигмента. Трем типам колбочкового фотопигмента соответствуют три главных класса аномалий цветового зрения, а именно: протанопия, дейтеранопия и тританопия.

У наблюдателя, страдающего протанопией (протанопа), отсутствует пигмент в L-колбочках, и следовательно, не может быть реализован красно-зеленый оппонентный механизм, в результате чего больной неспособен отличить красноватые оттенки от зеленоватых.

У дейтеранопов отсутствует пигмент в M-колбочках, и поэтому, также из-за недостаточности красно-зеленого оппонентного механизма, они не могут отличить красноватые оттенки от зеленоватых. Но все же протанопы и дейтеранопы иногда способны отличить красноватый от зеленоватого за счет относительной световой чувствительности, реализуемой путем суммирования сигналов от различных видов колбочек. Заметим также, что функция протанопической световой чувствительности смещена в сторону коротких длин волн.

У тританопов отсутствует пигмент в S-колбочках, а значит, из-за недостаточности желто-синего оппонентного механизма, они не могут отличить желтоватые оттенки от синеватых.

Аномальные трихроматы

Существуют также аномальные трихроматы, которые хоть и обладают трихроматическим зрением, но их способность различать специфические оттенки

уменьшена, поскольку имеет место сдвиг спектральной чувствительности фотопигментов или их загрязнение (к примеру, попадание L-колбочкового пигмента в M-колбочки). Среди аномальных трихроматов встречаются следующие:

— протаномальные трихроматы (слабая пигментация L-колбочек или смещение L-колбочковой абсорбции в сторону коротких волн);

— дейтераномальные трихроматы (слабая пигментация M-колбочек или смещение M-колбочковой абсорбции в сторону длинных волн);

— тританомальные трихроматы (слабая пигментация S-колбочек или смещение S-колбочковой абсорбции в сторону длинных волн).

Иногда встречается колбочковый монохроматизм (эффективен только один вид колбочек) или палочковый монохроматизм (колбочковые ответы вообще отсутствуют).

Наблюдатель с нормальным цветовым зрением не может представить себе, как воспринимает окружающий мир человек с той или иной цветовой аномалией, но у нас есть возможность продемонстрировать цветовые тона, которые становятся неразличимыми. На рис. 1.21 показаны два нормальных изображения и результаты их обработки по алгоритму имитации аномалий, опубликованному Бреттелем и коллегами (1997), с помощью инструментария, взятого с www.vischeck.com. Такая обработка позволяет продемонстрировать цвета, в которых путаются протанопы, дейтеранопы и тританопы, однако изучение аномалий цветового зрения в области моделирования цветового восприятия и цветового репродуцирования имеет скорее академический интерес.

Таблица 1.1 демонстрирует приблизительный процент людей с аномалиями цветового зрения от общей численности населения.

Из таблицы 1.1 ясно, что аномалии цветового зрения не так уж редки, особенно среди мужчин (примерно 8%), и что важно учитывать возможность появления наблюдателей с цветовыми аномалиями в разных сферах деятельности.

Таблица 1.1 Приблизительное процентное распределение различных аномалий цветового зрения. Основано на данных Ханта (1991)

Тип аномалии	Мужчины (%)	Женщины (%)
Протанопия	1.0	0.02
Дейтеранопия	1.1	0.01
Тританопия	0.002	0.001
Колбочковый монохроматизм	~0	~0
Палочковый монохроматизм	0.003	0.002
Протаномалия	1.0	0.02
Дейтераномалия	4.9	0.38
Тританомалия	~0	~0
Общее кол-во:	8.0	0.4



Рис. 1.21 Изображения, иллюстрирующие отсутствие цветоразличительной способности при разных типах аномалий цветового зрения: (a) оригинальные изображения; (b) протанопы; (c) дейтеранопы; (d) тританопы. Оригинал изображения птиц взят с Kodak Photo Sampler PhotoCD. Оригинал изображения девочек — авторский. Изображения обработаны при помощи www.vischeck.com.

Аномалии цветового зрения и половая принадлежность

Почему количество цветовых аномалий у мужчин и женщин неодинаково? Если обратиться к генетическим основам аномалий цветового зрения, то выяснится, что большинство обычных форм этих аномалий генетически связаны с полом.

Гены, отвечающие за фотопигмент, содержатся в X-хромосоме. Женщины унаследовали одну X-хромосому от матери и одну от отца. Для обеспечения нормального цветового зрения минимум одна хромосома должна содержать гены нормального синтеза фотопигмента. Мужчины унаследовали X-хромосому от матери и Y-хромосому от отца. Если единственная X-хромосома не со-

держит гена синтеза фотопигмента, то сын будет иметь аномалию цветового зрения. Если цветовая аномалия возникла у женщины, то это означает, что она имеет две неполноценных X-хромосомы и все ее сыновья обречены на цветовую аномалию. Итак, ясно, что когда речь идет о наследовании аномалий цветового зрения, генетическая «колода карт» перетасована не в пользу мужчин. Отметим, что за последние годы наши знания о генетических основах цветовых аномалий существенно углубились.

Одним из первых исследователей аномалий цветового зрения был Джон Дальтон, который изучал собственное зрение, считавшееся протанопическим, и придумал теорию, объясняющую данную аномалию. Дальтон предположил, что аномалия была вызвана патологической прокраской стекловидного тела, которая выступила в роли фильтра. Он сделал завещание, согласно которому после смерти исследователя его глаза должны были вскрыть с целью экспериментального подтверждения теории. Так и поступили, но, к сожалению, теория Дальтона оказалась неверной, однако же глаза ученого по сей день хранятся в манчестерском музее Великобритании. Хант с коллегами (1995), выполнив ДНК-исследование глаз Дальтона, смог показать, что Дальтон был дейтеранопом, а не протанопом, но при этом фотопигмент L-колбочек имел сдвиг спектральной чувствительности в сторону коротких волн. Также Хант провел колориметрическое исследование, показавшее, что данные генетических исследований коррелируют с наблюдениями Дальтона.

Отсев наблюдателей, выполняющих цветовые оценки

В связи с большой распространенностью аномалий цветового зрения, необходим отсев наблюдателей, предшествующий их допуску к экспертной цветовой оценке или оценке цветовых соответствий. Для этой цели существует множество разных тестов, но два из них имеют практическую ценность: это т.н. псевдоизохроматические пластины и стооттеночный тест Фарнсворта — Манселла.

Псевдоизохроматические пластины (к примеру, тест Ишихары на цветовую слепоту) — это цветные пластины, составленные из точек произвольной светлоты, среди которых находится образец или цифра, сформированные из точек, отличающихся по цветовому тону. Произвольная светлота точек — это прием, исключающий возможность распознавания образцов за счет светлотных отличий. Пластины предъявляются наблюдателям при определенном освещении, и затем испытуемых просят ответить, какой образец или цифру они видят. Пластины Ишихары имеют такие цветовые комбинации, которые трудно распознать наблюдателям с той или иной аномалией цветового зрения. Данные тесты, как правило, входят в состав инструментария обычной офтальмологической экспертизы, и их можно приобрести у дилеров по оптике либо у общенаучных дилеров. Отсев с использованием псевдоизохроматических пластин — это минимально-необходимая проверка для каждого, кто должен выполнять экспертную оценку цвета.

Стооттеночный тест Фарнсворта — Манселла, который можно приобрести в Munsell Color Company, содержит четыре набора раскрашенных фишек, кото-

рые следует разложить в определенной последовательности по цветовому тону: наблюдатели с разными аномалиями цветового зрения при раскладывании фишек будут допускать ошибки в разных секторах цветового круга. Тест может быть использован для диагностики разных типов аномалий, а также для оценки степени нарушения цветоразличительной способности. Этот тест также может быть использован для идентификации наблюдателей с нормальным цветовым зрением, но слабой цветоразличительной способностью.

1.7 КЛЮЧЕВЫЕ МОМЕНТЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

Данный параграф — это краткий обзор морфологии и физиологии зрительной системы человека, акцентированный на тех ее особенностях, что важны для моделирования и прогноза феномена цветового восприятия.

Важными элементами оптики глаза являются: хрусталик, макула и колбочковые фоторецепторы.

Хрусталик и макула воздействуют на цветовое восприятие, работая как желтые фильтры, и поскольку их оптическая плотность различна у разных людей, создают определенную вариабельность в наблюдателях.

Колбочки обеспечивают первую стадию цветового зрения, преобразуя спектральное распределение энергии на сетчатке в трехмерный сигнал, поступающий на обработку в высшие отделы зрительной системы. Такое преобразование является базисом метамеризма — фундаментального принципа колориметрии.

Численное соотношение колбочек (L:M:S приблизительно как 12:6:1) важно для получения оппонентных сигналов, представляемых зрительной системе. Корректное моделирование оппонентных сигналов требует учета упомянутого соотношения, а пространственное распределение палочек и колбочек и их латеральное взаимодействие критичны для спецификации размера стимула и его расположения на сетчатке.

Цветовое восприятие стимула, попавшего на центральную ямку сетчатки, отлично от восприятия стимула, попавшего на периферию. Пространственное взаимодействие в сетчатке, реализуемое горизонтальными и амакриновыми клетками, критично для тех механизмов, что отвечают за цветовое восприятие при изменении фона, окружения и уровня адаптации.

Кодирование цветовой информации через оппонентные каналы наряду с адаптационными механизмами проявляющими себя до, во время и после данной стадии, — это, пожалуй, самая важная особенность зрительной системы человека, которая обязательно должна учитываться моделями цветового восприятия.

Любая из моделей включает в себя стадию хроматической адаптации, стадию оппонентной обработки и функции нелинейного ответа; некоторые модели вдобавок ко всему включают в себя эффекты световой и темновой адаптаций, а также взаимодействие между палочковой и колбочковой системами.

Наконец, достаточно сильно влияют на цветовое восприятие когнитивные механизмы зрения, такие, как цветовая память и обесцвечивание осветителя.

Эти и другие феномены будут детально описаны в главах 6–8.

2 ПСИХОФИЗИКА

Для создания и применения моделей цветового восприятия, бесспорно, необходимо понимание основных функций зрительной системы человека, необходимость же понимания принципов психофизики не кажется столь очевидной. Однако именно психофизические методы заложили основу нашего знания о зрительной системе человека и о феномене цветового восприятия. Психофизические методы — фундамент как самоей колориметрии, так и ее продолжения — моделей цветового восприятия.

Психофизические методы также используются для получения, проверки и сравнения данных, совершенствующих модели цветового восприятия, поэтому знакомство с основами психофизики необходимо для понимания методик использования и методик оценки моделей цветового восприятия. Плюс к тому, психофизические методы, описанные в данной главе, всегда помогут убедиться в работоспособности той или иной модели.

Данная глава — это краткий обзор экспериментов со зрением и анализ результатов этих экспериментов. Тщательно проводимые психофизические опыты позволяют выполнить точную количественную оценку феномена восприятия, которое, к сожалению, часто рассматривают как сугубо субъективное явление. Результаты психофизических экспериментов имеют огромное значение в широком диапазоне сфер деятельности, включающих цветовые измерения и оценку качества воспринимаемых изображений. В текущей главе мы дадим обзор различных видов психофизических экспериментов со зрением, а также обзор методик проведения пороговых экспериментов, экспериментов на цветовое соответствие и экспериментов по психометрическому шкалированию; кратко обсудим вопросы обработки данных и их анализ.

Изложение психофизики будет основано на Стандартном руководстве по организации и проведению визуальных экспериментов (ASTM 1996), которое в свою очередь основано на материалах RIT-курса автора данной книги. Также можно порекомендовать ряд великолепных работ по психофизике, дополняющих материал настоящей главы. Это труды Гешайдера (1984), Бартлесона и Грума (1984), Торгерсона (1958) и Тарстона (1959). К сожалению, по последним трем ссылкам материал можно найти только в библиотеках. Любопытный обзор применения психофизики в оценке качества изображений был представлен Энгельдрумом (1995). Материалы Энгельдрума (2000) по психометрическому шкалированию — это прекрасное описание современных психофизических методов исследования, а также сфер применения их результатов.

2.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПСИХОФИЗИКИ

Психофизика — это наука, изучающая взаимоотношения между физически измеряемыми стимулами и ощущениями, вызываемыми этими стимулами.

Психофизику как науку можно по праву поставить в один ряд с традиционными дисциплинами: физикой, химией и биологией.

Психофизическим инструментарием пользуются для выполнения количественных измерений, характеризующих феномен восприятия, который, напомним, часто считают сугубо субъективным явлением. Отметим, что результаты грамотно разработанных психофизических экспериментов являются столь же объективными и количественными, как измерение длины по линейке (или любое другое физическое измерение). Однако важно то, что стабильность результатов при психофизических измерениях ниже, чем при других физических измерениях. В то же время, результаты психофизических экспериментов полезны и значимы, если данная нестабильность учтена (подобно тому, как она учитывается при физических измерениях). Психофизика изучает все параметры человеческого восприятия, но поскольку тема данной книги — это восприятие цветовое, мы будем детально обсуждать психофизику зрения.

Два класса экспериментов со зрением

Эксперименты со зрением делятся на два больших класса:

1. *Эксперименты по определению порогов и соответствий,* проводимые для измерения визуальной чувствительности к малым изменениям в стимуле (или в перцепционном равенстве).

2. *Эксперименты по психометрическому шкалированию,* предназначенные для выявления взаимоотношений между физическими и перцепционными величинами стимула.

В первую очередь крайне важно определить, эксперимент какого класса необходим в том или ином случае.

Пороговые эксперименты подходят для измерения визуальной выявляемости стимула и чувствительности к его изменениям. Пороговый эксперимент можно провести, к примеру, для экспертизы двух моделей цветового восприятия, дающих разные практические результаты, или, к примеру, для оценки качества алгоритма сжатия изображения и ответа на вопрос: действительно ли этот алгоритм не ведет к визуальным потерям?

Эксперименты по психометрическому шкалированию подходят для тех случаев, когда необходимо определить взаимоотношения между стимулами, к примеру: эксперимент по шкалированию может быть проведен с целью выявления численных взаимоотношений между визуальным качеством отпечатанного изображения и адресным разрешением принтера. В моделировании цветового восприятия результаты экспериментов по психометрическому шкалированию используются для выявления взаимоотношений между физически измеряемыми колориметрическими величинами (к примеру, координаты CIE XYZ) и такими цветовыми атрибутами, как светлота, насыщенность и цветовой тон.

2.2 ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Психофизику, как и любую другую научную дисциплину, легче освоить, если обратиться к истории ее развития, однако, несмотря на то, что ученые столетия-

ми экспериментировали со своими ощущениями и тщательно фиксировали наблюдения за ними, формальной психофизике не более 150 лет. Важными вехами в истории психофизики являются работы Вебера, Фехнера и Стивенса.

Труды Вебера

В начале XIX столетия Эрнст Генрих Вебер (1795–1878) исследовал восприятие веса. Вебер просил наблюдателей поднять гирьку, а затем, при всем необходимом экспериментальном контроле, понемногу увеличивал вес, пока наблюдатель не начинал отличать результирующий вес от изначального, то есть, Вебер проводил опыты по измерению весового порога. Ученый заметил, что если увеличивать изначальный вес, то его приращение, необходимое для достижения порога, пропорционально повышается. Если начальное количество стимула (в данном случае веса) обозначить как I, а изменение веса, необходимое для достижения порога, обозначить как ΔI, веберовские результаты можно выразить как постоянный коэффициент $\Delta I/I$. Это соотношение, именуемое *законом Вебера,* в целом постоянно для многих стимулов восприятия.

Веберовский результат весьма интуитивен: представьте себе, что вы несете небольшую стопку бумаги, а затем добавляете к ней еще 20 листов, — понятно, что вы почувствуете изменение в весе. Теперь представьте себе, что вы тащите портфель, набитый книгами и бумагами, а затем добавляете все те же 20 листов, — добавленный вес скорее всего останется незамеченным. Сказанное означает, что при большей интенсивности начального стимула для достижения порога восприятия потребуются большие изменения.

Закон Вебера, к примеру, объясняет то, почему днем не видно звезд. Ночью звезды обеспечивают некое приращение интенсивности (ΔI) к общей фоновой яркости неба (I), превышающее визуальный порог, благодаря чему звезды видны. В течение дня звезды дают все то же приращение интенсивности (ΔI) к фоновой яркости, однако фоновая яркость дневного неба (I) намного больше яркости ночного, а отношение $\Delta I/I$ намного меньше — такое низкое, что звезд не видно.

Труды Фехнера

Следующая веха в истории психофизики — это труды Густава Теодора Фехнера (1801–1887). Для получения математических соотношений между интенсивностью стимула и величиной восприятия Фехнер использовал работы Вебера. Он пытался решить проблему взаимосвязи тела и разума, доказывая, что функции разума могут быть физически измерены. Благодаря своей работе «Элементы психофизики», опубликованной в 1860 году, он прославился и неожиданно для самого себя был объявлен отцом-основателем психофизики.

Фехнер начал с двух основных предположений:

1. Закон Вебера верен.

2. Т.н. «едва заметное отличие» (just-noticeable difference — JND) можно считать единицей восприятия.

Веберовские результаты показали, что «едва заметные отличия» (JND), измеренные по физической шкале, действительно не равны между собой, но не

потому, что повышается интенсивность стимулов, а скорее потому, что повышается соотношение интенсивностей стимулов. Фехнер стремился получить преобразование шкалы интенсивностей физических стимулов в шкалу величин восприятия, в которой JND имели бы одинаковый размер для всех перцепционных величин. Одним из решений данной проблемы является дифференциальное уравнение, составленное на основе закона Вебера, благодаря чему JND по шкале интенсивностей стимулов стали располагаться в геометрической прогрессии. Логарифмическое преобразование привело к уравниванию величин приращения JND на шкале восприятия, благодаря чему JND, представленные равными соотношениями по физической шкале, преобразуются в равные приращения по шкале восприятия. Такое преобразование известно как *закон Фехнера*. Проще говоря, закон Фехнера гласит, что величины восприятия стимула пропорциональны логарифму его физической интенсивности. Данная зависимость проиллюстрирована рисунком 2.1.

Закон Фехнера приводит к т.н. нелинейной компрессии отношений между физическим измерением стимула и величинами его восприятия, что иллюстрирует понижение чувствительности при повышении интенсивности стимула (крутой участок кривой на рис. 2.1).

Если бы закон Фехнера был строго точен, то отношения были бы нелинейны для всех видов восприятия: действительно, нелинейная компрессия относится к большинству видов восприятия, но некоторые виды описываются функциями с иными формами кривых, и это значит, что закон Фехнера не до конца точен. Однако, в научной литературе о зрении есть множество примеров полного подчинения закону Фехнера (или по крайней мере закону Вебера).

Труды Стивенса

Апеллируя к ущербности результатов Фехнера, Стэнли Смит Стивенс (1906–1973) в 1961 г.[1] публикует работу с громким названием «Чтим Фехнера, но отменяем его закон». Стивенс изучал взаимоотношения между интенсивностью физического стимула и величиной восприятия для его 30 различных видов, используя при этом количественные методы оценки. Стивенс обнаружил, что его результаты дают прямые линии, когда логарифм величины восприятия взят как функция от логарифма интенсивности стимула, при этом прямые линии для различных видов восприятия имеют разный наклон. Прямые линии в логарифмических (log-log) осях соответствуют степенным функциям в линейных осях, а наклоны кривых в логарифмических осях — коэффициентам степенных функций в линейных осях.

Стивенс предположил, что отношения между величиной восприятия и интенсивностью стимула идут не по логарифмической функции Фехнера, а по степенной зависимости с различными степенными коэффициентами для различных видов восприятия, что известно как *степенной закон Стивенса*.

На рис. 2.1 показаны три вида степенных функций с различными коэффициентами. Когда степень меньше единицы, функция ведет к нелинейной компрес-

[1] То есть к 100-летию выхода в свет «Элементов психофизики». — *Прим. пер.*

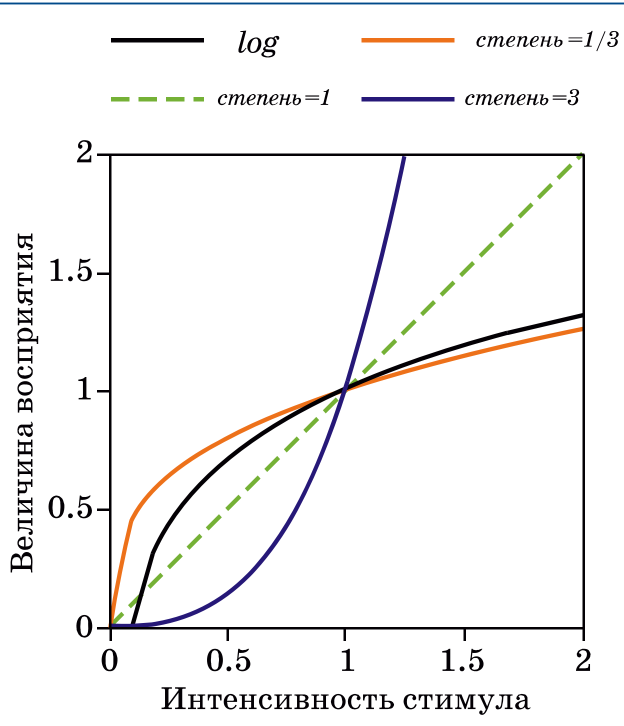


Рис. 2.1 Различные функции психофизических ответов: логарифмическая функция, предложенная Фехнером и степенные функции с различными коэффициентами, предложенные Стивенсом.

сии, характерной для большинства видов восприятия; когда степень равна единице, функция отражает линейные взаимоотношения (имеется ряд примеров линейной зависимости восприятия от физической интенсивности стимула, но важно отметить, что такая зависимость встречается только на очень коротких участках); когда степень больше единицы — отношения экспансивно нелинейны (такие отношения возникают при болевом восприятии, когда стимул вредоносен; если бы имела место компрессия болевого восприятия, то она оказалась бы очень опасной, поскольку наблюдатель становился бы все менее и менее чувствительным к стимулам, а опасность, соответственно, росла бы и росла).

Степенной закон Стивенса можно использовать для моделирования многих феноменов восприятия, он заложен в основу цветовых измерений, в частности во взаимоотношения между координатами CIE XYZ и независимыми переменными светлоты и насыщенности в цветовом пространстве CIE LAB (последние основаны на корнекубической компрессивной степенной нелинейности).

2.3 КЛАССИФИКАЦИЯ ШКАЛ

При создании шкал величин восприятия крайне важным является понимание свойств этих шкал, но зачастую психофизические методики используют шкалы с весьма ограниченным математическим смыслом, из-за чего большая часть математических операций к этим шкалам неприменима.

Определены четыре ключевых вида шкал (в порядке возрастания математического смысла и сложности): номинальные, порядковые, интервальные и пропорциональные шкалы.

Номинальные шкалы

Номинальные шкалы в целом просты: они сортируют объекты по имени. Номинальная шкала цветов состоит из категорий красных, желтых, зеленых, синих и нейтральных оттенков, и шкалирование в данном случае — это решение вопроса о том, какой цвет к какой категории отнести.

В отношении номинальных данных может быть выполнено лишь их именование.

Порядковые шкалы

Порядковые шкалы — это шкалы, элементы которых расположены либо в восходящей, либо в нисходящей последовательности, основанной соответственно на большем или меньшем количестве специфического признака восприятия. Набор цветовых образцов можно рассортировать по цветовому тону, а затем в каждом диапазоне тонов образцы можно расположить от светлых к темным, например, неравноконтрастный набор образцов можно разложить так: три темно-, один средне- и два светло-зеленых образца. Если теперь пронумеровать образцы от одного до шести по мере возрастания их светлоты, то мы получим порядковую шкалу. Такая шкала не будет нести никакой информации о том, насколько один зеленый образец светлее другого, и очевидной будет лишь неравноконтрастность набора образцов.

Весь смысл порядковых шкал состоит в том, что образцы по данному признаку расположены в восходящей или нисходящей последовательности: контраст между образцами может быть больше или меньше и может меняться вверх и вниз по шкале.

К порядковым шкалам применимы такие логические понятия, как «больше», «меньше» или «равно».

Интервальные шкалы

У интервальных шкал равные интервалы: шкала является интервальной, если, к примеру, образцы в первой паре, во второй паре и на любом другом участке шкалы отличаются на две неких единицы, то есть если разница между любыми соседними образцами — две единицы; таким образом, в интервальных шкалах отличия восприятия в парах равны между собой, но при этом у этих шкал нет нулевой отметки.

Наряду со всеми логическими понятиями, применимыми к номинальным и порядковым шкалам, к интервальным шкалам применимы математические операции сложения и вычитания.

Примером интервальных шкал могут служить температурные шкалы Цельсия и Фаренгейта.

Пропорциональные шкалы

Пропорциональные шкалы обладают всеми свойствами вышеперечисленных шкал, но вдобавок ко всему у них имеется оправданная нулевая отметка, благо-

даря которой на пропорциональной шкале можно уравнять соотношения значений. Пропорциональные шкалы, описывающие работу зрения, очень сложны, и подчас их просто невозможно получить, поскольку нередки случаи, когда существование обоснованной нулевой точки невозможно, к примеру: относительно легко создать интервальную шкалу для оценки качества изображения, но попробуйте вообразить изображение нулевого качества. Можно верно построить шкалы цветового тона, но никакого психофизического смысла в нулевом цветовом тоне нет.

Все математические операции, применимые к интервальным шкалам, а также умножение и деление, применимы к шкалам пропорциональным.

Примеры использования шкал

Будет весьма полезным подкрепить вышеизложенный материал конкретными примерами. Представим себе, что нужно измерить рост всех людей в данной комнате. Если использовать только номинальную шкалу, вы можете выбрать первого субъекта и присвоить его (или ее) росту некое имя, скажем, Джо. Затем вы можете сравнить рост каждого следующего субъекта с Джо, и если рост какого-то другого человека совпадет с Джо (в разумных пределах, конечно), росту этого человека также будет присвоено имя Джо. Если рост человека отличен от Джо, ему будет присвоено иное имя. Сравнение ростов каждого из присутствующих в комнате будет идти до тех пор, пока каждому уникальному росту не будет присвоено уникальное имя. Отметим, что при этом нет никакой информации о том, кто выше, а кто ниже: единственная доступная информация — это информация о том, имеются ли в комнате субъекты с одинаковым ростом (и поэтому с одинаковым его именем) или нет.

Если для измерения роста использовать порядковую шкалу, то Джо можно произвольно объявить нулевым ростом. Если рост следующего субъекта окажется больше Джо, то его (или ее) росту будет присвоен больший номер, скажем, 10. Если рост третьего субъекта окажется больше Джо, но меньше, чем рост второго субъекта, ему будет присвоен промежуточный номер. Так будет продолжаться до тех пор, пока все присутствующие в комнате не получат номер, характеризующий их рост. Величина произвольно присвоенных номеров ничего не говорит нам о том, насколько меньше или насколько больше рост первого субъекта, чем рост любого другого.

Если для измерения роста использовать интервальную шкалу, Джо по-прежнему будет произвольно объявлен нулевым ростом, но прочим субъектам в этом случае будут назначены росты с определенным приращением относительно Джо, например, +3 см (выше Джо) или −2 см (ниже Джо). Если рост субъектов «А» и «В» равен +3 см и −2 см в соответствии с данной шкалой, то можно сказать, что субъект «А» на 5 см выше, чем субъект «В». Отметим, что при этом по-прежнему нет никакой информации о том, каков абсолютный рост каждого субъекта. Таким образом, единственная польза от данной интервальной шкалы — это информация об отличиях в росте субъектов.

Наконец, если для измерения роста использовать пропорциональную шкалу (обычная ситуация), Джо может оказаться равным 182 см, при этом росты

субъектов «А» и «В» окажутся равными 185 и 180 см соответственно. Если бы некто оказался ростом в 91 см, то можно было бы сделать вывод, что Джо вдвое больше, чем рост этого субъекта. Заметим, что в данном случае отметка 0 см имеет физический смысл, а истинная пропорциональная шкала может использоваться для ростовых измерений, причем в отношении ее значений могут быть выполнены умножение и деление.

2.4 ПОРОГОВЫЕ МЕТОДЫ

Пороговые эксперименты выполняются для выявления т.н. «едва воспринимаемых отличий» в стимулах — отличий, которые также называют «едва заметными отличиями» (JND). Пороговые методы используются также для измерения чувствительности наблюдателей к изменениям в одном стимуле. Абсолютные пороги определяются как едва воспринимаемое отличие между стимулом и его отсутствием, а пороги отличия представляют едва воспринимаемое отличие в стимулах, не равных нолю. Пороги описывают в физических единицах, используемых для измерения стимулов, к примеру: яркостный порог может быть измерен в единицах яркости cd/m^2. Чувствительность — это величина обратная порогу, то есть низкий порог подразумевает высокую чувствительность.

Пороговые методы используются для определения т.н. визуальной толерантности, которая важна при оценке восприятия цветовых отличий.

Виды пороговых экспериментов

Существует несколько основных видов пороговых экспериментов, которые представлены ниже в порядке возрастания сложности экспериментальной организации и ценности получаемых данных. Для разных сфер применения разработано множество методик таких экспериментов. Экспериментаторы стараются минимизировать возможность контроля результатов эксперимента наблюдателями, дабы сократить влияние на результаты различных оценочных критериев наблюдателя (но добиться этого, как правило, удается за счет усложнения процедуры экспериментов).

Пороговые методы следующие:

— метод регулировки;

— метод пределов;

— метод постоянных стимулов.

Метод регулировки

Метод регулировки — это простейшая и наиболее прямая техника определения пороговых данных, в которой наблюдатель регулирует величину стимула и повышает ее от нулевого уровня до уровня начала восприятия (абсолютный порог), либо, в дальнейшем, до уровня появления едва заметного отличия в восприятии (порог отличия). Порог считается установленным, когда усреднены данные от одного или нескольких наблюдателей.

Метод регулировки хорош тем, что проводится легко и быстро, однако его

недостаток состоит в подконтрольности стимула наблюдателю, что может исказить результаты за счет вариабельности субъективных критериев и адаптационных эффектов. Если наблюдатель подходит к порогу, что называется, сверху, то адаптация может вызвать увеличение порога, чего не произойдет при подходе к порогу снизу. Часто пороговый метод применяется для получения первичной оценки порога, которая в дальнейшем будет использована в значительно более сложных экспериментах.

Метод регулировки также используется в экспериментах сравнения, включающих в себя т.н. эксперименты ассиметричных соответствий (используются в изучении цветового восприятия).

Метод пределов

Метод пределов чуть сложнее, чем метод регулировки. В методе пределов экспериментатор в порядке возрастания (или убывания) предъявляет стимулы с предопределенным дискретным уровнем интенсивности.

Для возрастающего ряда экспериментатор предъявляет стимулы, начиная с гарантированно невоспринимаемого, и просит наблюдателей отвечать «да», если они восприняли стимул, и «нет», если не восприняли. Если они отвечают «нет», экспериментатор повышает интенсивность стимулов и начинает новое испытание, и так продолжается до тех пор, пока наблюдатели не скажут «да».

Для убывающего ряда начинают со стимула той интенсивности, при которой он устойчиво воспринимается, и понижают ее до тех пор, пока наблюдатели не скажут «нет», — это значит, что они перестали воспринимать этот стимул.

Порог считается установленным, когда усредненное значение интенсивности стимула при переходе от «да» к «нет» (или от «нет» к «да») получено для определенного номера из возрастающего или убывающего рядов. Усреднение результатов рядов обоих типов сводит к минимуму влияние эффектов адаптации, однако же наблюдатели все еще находятся под властью личных критериев выбора, поскольку могут ответить «да» или «нет» по собственному усмотрению.

Метод постоянных стимулов

В методе постоянных стимулов экспериментатор выбирает несколько уровней интенсивности стимула (обычно от 5 до 7), лежащих вокруг уровня порога. Каждый стимул в случайном порядке много раз предъявляется наблюдателю, а по окончании испытания определяется частота восприятия стимулов каждого из уровней интенсивности. По полученным данным может быть построена т.н. кривая частоты наблюдения, то есть психометрическая функция, позволяющая определить как сам порог, так и его колебание. Порог считается в целом установленным, когда стимул каждой интенсивности воспринят по меньшей мере в 50% случаев.

* * *

Психометрические функции могут быть получены для любого отдельного наблюдателя (через множественные испытания) или для группы наблюдателей

(одно или несколько испытаний на наблюдателя). Существуют два метода получения информации от наблюдателей:

— метод «да — нет» (или «зачет — не зачет»);

— метод принудительного выбора.

Метод «да — нет»

При данном методе наблюдателей просят ответить «да», если они распознают стимул (или изменения в стимуле), и «нет», если не распознают. Психометрическая функция в данном случае — это процентовка «да»-ответов как функция от интенсивности стимула, а 50% «да»-ответов толкуется как уровень порога. Альтернативно данный метод может быть использован для измерения визуальных допусков над порогом, обеспечивающим эталонную интенсивность стимула, к примеру, цветовое отличие в фиксированной паре: наблюдателей просят зачесть стимул, если его интенсивность оказалась ниже эталонной (допустим, малое цветовое отличие), и не зачесть его, если интенсивность оказалась выше эталонной (скажем, большое цветовое отличие). Психометрическая функция в данном случае — это процент незачетных ответов как функция от интенсивности стимула, а 50% незачетов считается точкой визуального равенства стимулов.

Метод принудительного выбора

Метод принудительного выбора устраняет влияние различных наблюдательских критериев на результаты эксперимента, что достигается предъявлением стимула в одном из двух пространственных (либо временных) интервалов: наблюдателей просят установить, в каком из двух интервалов стимул был предъявлен. Наблюдателям не разрешается отвечать, что стимул не был предъявлен вообще, и, если они сомневаются, их вынуждают предположить, в каком из двух интервалов был предъявлен стимул (отсюда и название метода). Психометрическая функция в данном случае — это процент верных ответов как функция от интенсивности стимула, а область изменения функции — это диапазон от 50% верных ответов, данных на основании предположения, до 100% верных ответов, данных на основании уверенного выявления стимула той или иной интенсивности. Порог в данном случае определен как интенсивность стимула, при которой наблюдатели ответили правильно в 75% случаев и, следовательно, распознали стимул в 50% случаев. Пока наблюдатели отвечают честно (при этом неважно, либеральны они или консервативны), их личные критерии не могут повлиять на результаты эксперимента.

Ступенчатые методы

Ступенчатые методы — это модифицированные методы принудительного выбора, которые служат только для выявления пороговой точки на психометрической функции. Ступенчатые методы используются только тогда, когда предъявление стимула может быть полностью автоматизировано. Стимул

предъявляется, а наблюдатель отвечает, что его распознал: если ответ верный, стимул той же интенсивности предъявляется вновь; если ответ неверный, то интенсивность стимула повышается. Если наблюдатель правильно отвечает при трех последовательных тестах, то интенсивность стимула понижается. Интенсивность стимула понижается пошагово и до тех пор, пока не будет достигнута желаемая точность в определении порога. Последовательность из трех правильных (или неправильных) ответов, которая привела к изменению интенсивности стимула в результате дает конвергенцию интенсивностей стимулов, верно определенных в 79% тестов ($0.793^3=0.5$), то есть очень близко к номинальному пороговому уровню (75%).

Зачастую несколько независимых друг от друга ступенчатых методов используются одновременно, чтобы, как говорят, рандомизировать эксперимент (то есть придать ему случайный характер). Ступенчатый метод также можно реализовать при помощи «да — нет»-ответов.

Пробитовый анализ пороговых данных

Пороговые данные, которые создают психометрическую функцию, могут быть наиболее эффективно оценены с помощью т.н. пробитового анализа, используемого для определения совокупного нормального распределения данных (психометрическая функция). Пороговая точка и ее неопределенность могут быть легко установлены путем т.н. заполняющего распределения, а выполненную оценку данных можно проверить на достоверность с помощью ряда специальных тестов.

Финней (1971) существенно развил теорию и детально разработал методику применения пробитового анализа. Сегодня для выполнения пробитового анализа можно использовать некоторые коммерческие статистические компьютерные программы.

2.5 МЕТОДЫ СРАВНЕНИЯ

Методы сравнения подобны пороговым методам, но отличаются от них своей задачей — она состоит в выявлении визуального равенства двух стимулов, что иногда бывает полезным в оценке порогов.

Эксперименты сравнения — это базис CIE-колориметрии, в которой метамерные равенства используются для получения т.н. функций цветового соответствия (color matching functions): к примеру, если данный цветовой стимул визуально соответствует аддитивной смеси первичных красного, зеленого и синего световых потоков и спектральное распределение смеси при этом не идентичного спектральному распределению тестируемого цветового стимула, то соответствие считается метамерным. Физические параметры таких соответствий могут быть использованы для получения т.н. фундаментальных чувствительностей зрительной системы человека и для создания системы трехстимульной колориметрии (см. главу 3).

Асимметричное соответствие

При изучении хроматической адаптации, а также феномена цветового восприятия часто используются эксперименты сравнения. В некоторых случаях применяется методика получения т.н. асимметричного соответствия. Асимметричное соответствие — это цветовое соответствие, полученное путем некоторого изменения условий просмотра: к примеру, стимул, рассматриваемый при дневном свете, может визуально соответствовать другому стимулу, рассматриваемому при свете ламп накаливания, благодаря чему можно получить пару стимулов, идентичных по цветовому восприятию при данных изменениях в условиях просмотра. Такие данные могут использоваться для создания и тестирования моделей цветового восприятия, разрабатываемых с целью учета изменений в условиях просмотра.

Отдельным вариантом эксперимента на асимметричное соответствие является т.н. гаплоскопический эксперимент, при котором в один глаз попадает тестируемый стимул при одних условиях просмотра, а в другой глаз одновременно попадает стимул сравнения при других условиях просмотра: наблюдатель одновременно видит оба стимула и производит уравнивание.

Сравнение по памяти

Другой тип экспериментов сравнения, которые иногда проводят для изучения цветового восприятия, называют сравнением по памяти, то есть наблюдатель производит уравнивание с предварительно запоминаемым цветом. Обычно эти соответствия, которые также являются асимметричными, используются для изучения зависимости восприятия от условий просмотра. Иногда сравнение по памяти создает т.н. ментальный стимул, как, например, идеальный ахроматический (серый) или стимул с однозначным цветовым тоном (к примеру, однозначный красный без синего или желтого компонента).

2.6 ОДНОМЕРНЫЕ ШКАЛЫ

Эксперименты по шкалированию предназначены для выявления взаимоотношений между величиной восприятия и физически измеряемой интенсивностью стимула. Подходы к проведению этих экспериментов зависят от типа и размерности требуемой шкалы. Как правило, тип шкалы и метод шкалирования выбирают заранее, то есть до того, как будут собраны визуальные данные.

Одномерные шкалы требуют выполнения того условия, что измеряемый признак и физические вариации стимула одномерны: наблюдателей просят оценить стимул только по одному перцепционному признаку (например, насколько один образец светлее другого или какова разница в качестве между двумя изображениями).

Было придумано множество разнообразных методов шкалирования, в частности:

— метод последовательных рядов;

— метод графического описания;

— метод категорийного шкалирования;
— метод парного сравнения;
— метод дробного шкалирования;
— метод количественной оценки или воспроизводства (стимула);
— метод порционной оценки или воспроизводства (стимула).

В *эксперименте последовательных рядов* наблюдателя просят расположить образцы из набора с учетом возрастания или убывания величины того или иного признака; при большом числе наблюдателей данные могут быть усреднены и перерасположены для получения порядковой шкалы.

Для получения интервальной шкалы, в отношении экспериментальных данных должны быть приняты некоторые допущения, а также должен быть проведен дополнительный анализ этих данных. Одно из возможных допущений состоит в том, что стимулы в каждой паре были сравнены и таким образом от последовательного ряда получены данные парного сравнения (см. ниже). В целом возможность построения достоверной интервальной шкалы из последовательных рядов представляется весьма сомнительной.

Графическое описание позволяет напрямую определить интервальную шкалу: наблюдателям предъявляют стимулы и просят определить величину их восприятия по одномерной узелковой шкале. К примеру, в эксперименте по шкалированию светлоты может быть вычерчена линия, один конец которой помечается узелком как белый, а другой — как черный; предъявляемый наблюдателям промежуточный (серый) стимул по ощущениям оказывается посередине между черным и белым, что отмечается на линии как центральная точка. Если следующий образец окажется ближе к белому, чем к черному, он будет отмечен узелком в соответствующем месте линии — ближе к ее «белому» концу.

Интервальную шкалу строят для того, чтобы найти среднее местоположение для каждого стимула. Данный метод опирается на общеизвестный факт, что восприятие длины через короткие отрезки линейно по отношению к физически измеренной длине.

Категорийное шкалирование — это популярный метод создания порядковых и интервальных шкал для большого количества стимулов: наблюдателя просят разделить большое число образцов на разные категории, и по каждому образцу фиксируется то, в какую категорию он был помещен наблюдателем. Чтобы шкалирование было эффективным, образцы должны быть достаточно похожими друг на друга, дабы они не оказывались в разных категориях у разных наблюдателей (или же у одного наблюдателя, но в разных случаях).

Интервальные шкалы с помощью данного метода можно получить, допустив что величины восприятия нормально распределены путем стандартного нормального распределения, согласно т.н. закону категорийных оценок (Торгерсон, 1954).

Эксперимент на *парное сравнение* проводится при малом числе стимулов: в этом методе все образцы предъявляются наблюдателю во всех возможных парных комбинациях, обычно одна пара за сеанс (иногда вместе с третьим, эталонным стимулом). В итоге в какой-то одной паре соотношение по какому-то одному признаку будет оценено как наибольшее, и тогда рассчитываются и за-

писываются соотношения в остальных парах. Интервальные шкалы могут быть построены на основе полученных данных путем применения т.н. закона сравнительных оценок (Тарстон, 1927).

Закон сравнительных оценок (закон Тарстона) может быть успешно применен к порядковым данным (таким, как данные парного сравнения или категорийного шкалирования) для определения величин на интервальной шкале. На результирующих шкалах величины восприятия подвергаются нормальному распределению. Таким образом, если сделать осторожное допущение, что величины восприятия нормально распределены на истинной перцепционной шкале, то в результате анализа данных можно получить шкалу желаемой категории. Величины восприятия позволяют также оценить статистическую значимость различий между стимулами, так как здесь во всей полноте можно использовать нормальное распределение.

Торгерсон (1958), Бартлесон и Грум (1984), а также Энгельдрум (2000) детально описывают упомянутые и некоторые другие методы анализа данных, а ASTM (1996) описывает простой метод получения т.н. доверительных пределов на интервальной шкале Тарстона, но поскольку ASTM-метод консервативен, он менее точен и с его помощью трудно получить строго статистические данные. Монтаг и др. (2004) описали т.н. монтекарловскую имитацию данной проблемы и рекомендовали более подходящий метод для получения доверительных интервалов, а Хэндлей (2001) описал ряд относительных методов.

Существует прямой метод получения интервальных шкал с помощью т.н. *дробного шкалирования*, суть которого в том, что равные интервалы делят пополам. Наблюдателю предъявляют два разных образца (A и B) и просят выбрать третий таким образом, чтобы он был равноотличен и от «A», и от «B», а полную интервальную шкалу получают последовательными делениями на 2.

Пропорциональные шкалы можно напрямую получить с помощью *метода количественной оценки стимула* (прямой метод) или *метода воспроизводства стимула* (обратный метод): наблюдателя просят присвоить стимулу номер согласно величине его восприятия, или же наоборот: наблюдателям называют номер и просят воспроизвести стимул с соответствующей перцепционной величиной. Эти методы могут использоваться не только для создания пропорциональных шкал, но также и для получения данных, предназначенных к многомерному шкалированию (если просить наблюдателей прошкалировать отличия в парах стимулов).

Чуть более сложный *метод порционной оценки* использует отношения оценок или отношения воспроизводств стимула. Перед наблюдателем ставится одна из двух возможных задач:

1. Выбрать или воспроизвести образец, который имеет некое предписанное отношение к стандартному.

2. Установить соответствующие отношения между двумя (или более) образцами.

В типичном эксперименте наблюдателям предъявляют образец и просят найти, выбрать или воспроизвести тестовый образец с половинным или удвоенным признаком. Конечно, в повседневной практике этот метод трудноосуществим

из-за сложности подготовки образцов и сложности наблюдательской оценки, однако его также можно применять для создания пропорциональных шкал.

2.7 МНОГОМЕРНОЕ ШКАЛИРОВАНИЕ

Многомерное шкалирование (multidimensional scaling — MDS) — это метод, подобный одномерному шкалированию, который, однако, не требует предварительного одномерного шкалирования по интересующему признаку и при котором размерность считают частью анализа. При многомерном шкалировании данные интервальных или порядковых шкал — это данные о сходстве или о различии между стимулами, а результат эксперимента — это многомерное геометрическое представление перцепционных взаимоотношений между стимулами, подобное многомерной карте.

Данные о различиях, требуемые для MDS, можно легко получить, проведя эксперименты по парному сравнению и по т.н. триадным комбинациям.

В эксперименте парного сравнения наблюдателю предъявляют все образцы всех возможных пар и затем просят выполнить количественную оценку перцепционных отличий в каждой паре. Результаты оценок парных комбинаций подвергают MDS-анализу.

В методе триадных комбинаций каждую из возможных комбинаций наблюдателям предъявляют три раза подряд, а затем просят оценить, какие два стимула в каждой триаде наиболее сходны друг с другом, а какие, напротив — более всего отличны друг от друга. Полученные данные в дальнейшем можно конвертировать в частоту оценки каждой пары как самой сходной или как самой отличной, а затем объединить частотные данные в т.н. матрицу подобия (или матрицу различия), используемую в MDS-анализе.

Методы MDS-анализа пользуются данными о подобии (или об отличии) как вход и выход некоей многомерной фигуры, состоящей из точек и представляющей размерность данных и отношения между ними, поэтому такие методы исследования необходимо использовать тогда, когда восприятие является многомерным (как, к примеру, цветовой тон, светлота и насыщенность) или когда многомерны физические вариации стимулов. Крузкал и Виш (1978) предлагают детальное описание таких методов, но отметим, что MDS-анализ не лишен недостатков.

Существует два класса MDS:

— метрический, требующий интервальных данных;

— неметрический, требующий только порядковых данных.

Оба класса MDS-методов завершаются построением выходных интервальных шкал.

Различный MDS-софт обрабатывает входные данные согласно их предполагаемой специфике, трактует отдельные случаи, создает метрики степеней согласия (или напряжения), метрики расстояния (к примеру, эвклидова расстояния или т.н. cityblock) и т.п. Отметим, что некоторые коммерческие статистические программы MDS-совместимы.

Классическим примером MDS-анализа является создание карты, представ-

ляющей расстояния между некоторыми городами США (Крузкал и Виш, 1978). В нашем примере карта строится с использованием матрицы отличий в расстояниях между восьмью городами, взятыми с атласа американских дорог (табл. 2.1).

Данные об отличиях проанализированы по MDS-методике, а напряжение (среднеквадратическая ошибка) использована как измерение степени согласия в порядке определения размерности данных. В нашем примере степень напряжения по первому измерению равна 0.12, тогда как напряжение во втором измерении практически нулевое — это означает, что двухмерная степень согласия, как и предполагалось, подходит, и на выходе мы имеем двухмерные координаты каждого города (табл. 2.2).

Вычерчивание двухмерных координат каждого города дает нам знакомую карту США (рис. 2.2), однако нужно отметить, что измерение 1 идет с востока на запад, а измерение 2 — с севера на юг, в результате чего мы имеем карту, оси которой обратны традиционным. Сказанное иллюстрирует одну из особенностей MDS, а именно ту, что определение выходных измерений требует post hoc-анализа[1] экспериментатором.

MDS-эксперименты могут использоваться для исследования размерности и структуры пространств цветового восприятия (к примеру, Индоу, 1998).

2.8 ПОСТАНОВКА ПСИХОФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В предыдущих разделах был дан обзор некоторых методов, используемых для получения психофизических порогов и шкал. Однако при постановке психофизических экспериментов возникает ряд проблем, ощутимо влияющих на результаты этих экспериментов, в частности, в исследовании цветового восприятия. Многие из ключевых факторов изменчивы, что говорит о необходимости дальнейшего развития основной колориметрии в направлении моделей цветового восприятия. Полное описание всех переменных, участвующих в эксперименте со зрением, могло бы легко заполнить несколько томов, тем не менее, многие из критичных проблем феномена цветового восприятия детально описаны в следующих главах. В данной главе мы ограничимся лишь кратким списком основных проблем, требующих рассмотрения и учета.

Важнейшими факторами, которые необходимо учитывать в экспериментах со зрением, являются (последовательность списка не имеет смыслового значения):

Возраст наблюдателя
Жизненный опыт наблюдателя
Количество наблюдателей
Отсев по аномалиям цветового зрения
Сообразительность наблюдателя
Инструкции
Контекст

---

[1] Post hoc — после этого (*лат.*). — *Прим. пер.*

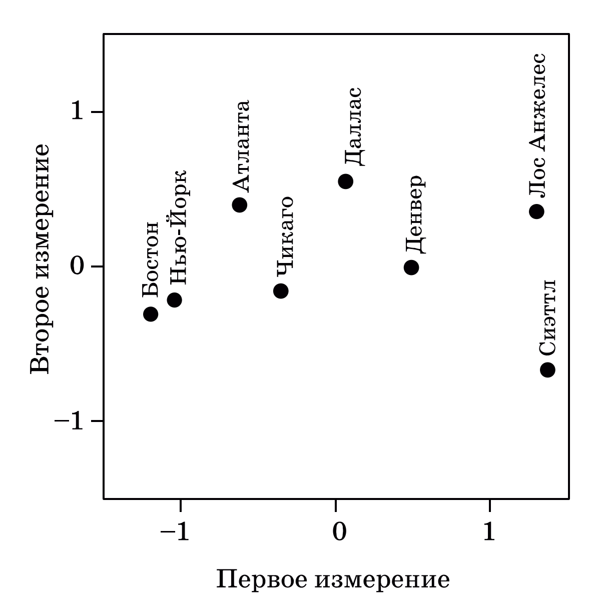


Рис. 2.2 Результат работы программы многомерного шкалирования (MDS) по созданию карты США на основании данных о соседстве городов (входные данные).

Таблица 2.1 Матрица различия, содержащая расстояния между городами США

	АТЛ	БС	ЧК	ДЛ	ДН	ЛС	СТЛ	Н-Й
АТЛ								
БС	1037							
ЧК	674	963						
ДЛ	795	1748	917					
ДН	1398	1949	996	781				
ЛС	2182	2979	2054	1387	1059			
СТЛ	2618	2976	2013	2078	1307	1131		
Н-Й	841	206	802	1552	1771	2786	2815	

Таблица 2.2 Выходные двухмерные координаты городов. Пример MDS

Город	Первое измерение	Второе измерение
Атланта	-0.63	0.40
Бостон	-1.19	-0.31
Чикаго	-0.36	-0.15
Даллас	0.07	0.55
Денвер	0.48	0.00
Лос Анжелес	1.30	0.36
Сиэттл	1.37	-0.66
Нью-Йорк	-1.04	-0.21

Обратная связь
Вознаграждение
Уровень освещения
Цвет освещения
Геометрия освещения
Фоновые условия
Условия окружения
Контроль и мониторинг глазных движений
Статус адаптации
Сложность наблюдательской задачи
Контроль результатов наблюдателем
Частота повторов
Диапазон эффектов
Регрессия эффектов
Содержание изображения
Число изображений
Продолжительность наблюдательской сессии
Мотивация наблюдателя
Когнитивные факторы
Статистическая значимость результатов

Все перечисленные (и многие другие) параметры оказывают радикальное влияние на психофизические результаты и должны быть тщательно описаны и/или проконтролированы. Учет всех этих факторов необходим как при выполнении экспериментов, так и при интерпретации и практическом применении их результатов в той или иной области.

2.9 ЗНАЧЕНИЕ ПСИХОФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Глубокое понимание процессов, имеющих место при психофизических экспериментах, ведет к осознанию необходимости разработки и развития моделей цветового восприятия и совершенствования методов их тестирования. Психофизические эксперименты дали нам большую часть знаний о зрительной системе человека (см. главу 1), и, безусловно, психофизика — это базис колориметрии. Результаты психофизических экспериментов применительно к феноменам цветового восприятия, хроматической адаптации и тестированию моделей цветового восприятия также обсуждаются в главах 6, 8 и 17. Короче говоря: без масштабных психофизических экспериментов мы не смогли бы получить знания, необходимые нам для создания и использования моделей цветового восприятия.

3 КОЛОРИМЕТРИЯ

Колориметрия — это основа системы научного описания феномена цветового восприятия. В данной главе будет дан обзор твердо устоявшейся практики колориметрии, согласованной с принятой в 1931 г. системой Международной комиссии по освещению (CIE). Система CIE позволяет детально описывать цветовые соответствия только для некоего среднего наблюдателя, но при этом она удивительно устойчива к постоянным нападкам со стороны промышленности и остается действующим международным стандартом более 70 лет (Райт, 1981; Фершильд, 1993). Однако CIE-колориметрия — это лишь отправная точка: в направлении прогнозов фактического восприятия стимулов в различных условиях просмотра систему CIE расширяют модели цветового восприятия, не ограничиваясь при этом лишь ответом на вопрос: соответствуют ли стимулы друг другу по восприятию или нет?

Данная глава дает общий обзор колориметрических концепций, определяющих ступени развития моделей цветового восприятия, но при этом не является детальным и полным описанием колориметрии, поскольку читателю доступно множество великолепных работ, освещающих этот вопрос. Для введения в колориметрию мы рекомендуем читателям познакомиться с работами Бернса (2000), Ханта (1991), Бергера-Шанна (1994), Хантера и Гарольда (1987). Точное определение колориметрии можно найти в первоисточнике — Публикации CIE №15.3 (CIE, 1986). Для глубокого изучения рекомендуем классическую книгу Вышецкого и Стайлса «Наука о цвете» (1982), а фундаментальный материал по теории и математике визуальных цветовых соответствий можно найти в работе Коэна (2001).

3.1 БАЗОВАЯ И ВЫСШАЯ КОЛОРИМЕТРИИ

Колориметрия занимается цветовыми измерениями.

Вышецкий (1973) указал на существенное различие между основной и высшей колориметриями (см. также Вышецкий, 1986), и поскольку это различие — основа данной книги и объект ее самого пристального внимания, здесь уместно процитировать слова самого Вышецкого, посвященные базовой и высшей колориметриям.

Базовую колориметрию Вышецкий (1973) описывает так:

«Колориметрия в строгом смысле — это инструмент прогнозирования того, будут ли соответствовать друг другу по цвету два световых потока (визуальных стимула) с разным спектральным распределением энергии при заданных условиях наблюдения. Прогноз определяется трехстимульными значениями (tristimulus values) двух визуальных стимулов, и если трехстимульные значения у одного стимула точно такие же, как и у другого, — цветовое соответствие

будет констатировано усредненным наблюдателем с нормальным цветовым зрением».

Область высшей колориметрии Вышецкий (1973) описывает следующим образом:

«Колориметрия в более широком смысле включает в себя методы оценки восприятия цветового стимула, предъявленного наблюдателю в сложном окружении, которое мы наблюдаем в повседневной жизни. Оценку восприятия считают конечной целью колориметрии, но из-за своей невероятной сложности эта цель очень далека от своего достижения. С другой стороны, некоторые аспекты общей проблемы прогнозирования цветового восприятия стимулов не кажутся столь неуловимыми: известные примеры — измерение цветовых различий, белизны и хроматической адаптации (хотя по большому счету и эти проблемы все еще не решены, и дальнейшая работа в этих областях весьма интересна и практически важна)».

Данная глава описывает известные положения базовой колориметрии, которые закладывают фундамент моделей цветового восприятия, и также в ней описаны некоторые широко используемые методы измерения цветовых отличий, которые являются одной из главных целей высшей колориметрии. Деление Вышецким колориметрии на базовую и высшую определяет назначение данной книги: описать исследования и моделирование, ориентированные на продвижение базовой колориметрии к ее конечной цели — колориметрии высшей.

3.2 ПОЧЕМУ ЦВЕТ?

Прежде чем начинать разговор о цветовых измерениях, необходимо рассмотреть самою природу цвета. На рис. 3.1 дан ответ на вопрос: «Почему цвет?». «Почему?» — здесь уместнее, нежели традиционное «Что такое?», поскольку цвет — непростая вещь, его довольно сложно растолковать тому, кто никогда не ощущал цвета, потому что цвет не может быть объяснен без конкретных примеров (см. главу 4).

Цвет — это атрибут зрительного ощущения, и результат цветового восприятия объектов зависит от трех компонентов, составляющих треугольник рисунка 3.1.

Первое, что требуется, — это источник видимой электромагнитной энергии, необходимой для запуска сенсорного процесса зрения. Энергия модулируется физическими и химическими свойствами объекта. Затем модулированная энергия попадает в глаз, обнаруживается фоторецепторами и обрабатывается нейронными механизмами зрительной системы человека, организуя наше цветовое восприятие. Отметим, что на рис. 3.1 источник света и зрительная система тоже связаны, дабы подчеркнуть влияние самого источника на цветовое восприятие через механизм хроматической адаптации и т.д.

Поскольку для возникновения цвета необходимы все три составных элемента треугольника, то для создания надежной системы физической колориметрии эти элементы должны быть определены количественно.



Рис. 3.1 Треугольник цвета. Цвет появляется за счет взаимодействия источников света, объектов и зрительной системы человека.

Источники света количественно описаны через спектральное распределение их энергии и стандартизованы как осветители.

Материальные объекты описываются их геометрией и спектральным распределением энергии излучения, отраженной от них или пропущенной ими.

Зрительная система человека количественно описана через ее способность к выявлению цветовых соответствий. Эта способность представляет собой т.н. первичный ответ (колбочковое поглощение) зрительной системы.

Таким образом, колориметрия, как комбинация всех перечисленных параметров, лежит на стыке физики, химии, психофизики, физиологии и психологии.

3.3 ИСТОЧНИКИ СВЕТА И ОСВЕТИТЕЛИ

Первым компонентом треугольника на рис. 3.1 является источник света, поскольку именно источники света испускают электромагнитную энергию, необходимую для возбуждения визуальных ответов.

Спецификация цветовых свойств источников света выполняется двумя путями: путем измерения и путем стандартизации. Отличие между этими методами становится понятным, если дать определения источников света и осветителей.

Источники света — это фактические излучатели видимой энергии. Лампы накаливания, небо (в тот или иной момент) и флуоресцентные трубки — примеры источников света.

Осветители — это стандартизованные таблицы значений, представляющих спектральное распределение энергии, типичное для некоего специфического источника. CIE-осветители A, D65 и F2 — это стандартизованное представление типичных «вольфрамового» (лампы накаливания), дневного и флуоресцентного источников соответственно.

Некоторые осветители описывают источники, являющиеся физическим воплощением (имитаторами. — *Прим. пер.)* стандартизованных спектральных распределений энергии, к примеру: A-источник CIE — это специфический тип вольфрамового источника, воспроизводящий спектральное распределение энергии CIE-осветителя A. Другие осветители не имеют соответствующих им источников света, к примеру: CIE-осветитель D65 — это статистическое представление усредненного дневного света с коррелированной цветовой температурой приблизительно 6500 K, и поэтому не существует CIE D65-источника, способного воспроизвести спектральное распределение энергии D65-осветителя.

Значимость отличия между источниками и осветителями в описании цветового восприятия обсуждается нами в главе 7 (см. таблицу 7.1), и поскольку чаще всего между спектральным распределением энергии CIE-осветителя и источником, его имитирующим, возникает существенная разница, в колориметрических вычислениях для стимулов, участвующих в описании цветового восприятия, должно использоваться фактическое спектральное распределение энергии источника света.

Спектрорадиометрия

Измерение спектральных распределений энергии источников света — сфера радиометрии. Спектрорадиометрия — это измерение радиометрических величин как функций от длины волны. Для цветовых измерений интерес представляет область примерно от 400 нм (фиолет) до 700 нм (красный). Существуют различные радиометрические величины, которые описывают свойства источника света, но специфический интерес для измерения цветового восприятия представляют *облученность* и *энергетическая яркость*. Единицы обоих видов измерения энергии источников — ватты.

Облученность (поверхностная плотность излучения) — это энергия излучения, падающего на поверхность, на единицу площади этой поверхности, и ее единицы — это ватты на метр квадратный (Вт/м^2). Спектральная облученность (спектральная плотность излучения) добавляет к определению облученности зависимость от длины волны; единицы спектральной облученности — Вт/м^2 • нм (иногда обозначается как Вт/м^3).

Энергетическая яркость отличается от облученности тем, что измерение энергии излучения источника (или поверхности, а точнее, энергии, исходящей от поверхности) производится на единицу площади в единице телесного угла и обозначается как ватты на метр квадратный на стерадиан (Вт/м^2 • ср). *Спектральная энергетическая яркость*, включающая в себя еще и зависимость от длины волны, измеряется в Вт/м^2 • ср • нм или Вт/м^3 • ср.

Интересным свойством энергетической яркости является то, что она не за-

висит от свойств оптической системы и расстояния, и, таким образом, зрительная система человека соразмерно отвечает на энергетическую яркость.

Измерение ответа зрительной системы является ключевым моментом в описании цветового восприятия. Сама сетчатка пропорционально отвечает на собственную облученность, а в комбинации с оптикой глазного яблока облученность сетчатки пропорциональна энергетической яркости рассматриваемой поверхности. В этом можно убедиться, рассматривая освещенную поверхность с разных расстояний и наблюдая при этом, что субъективная яркость не меняется (если не меняется энергетическая яркость самой поверхности). Облученность глаза от данной поверхности обратно пропорциональна квадрату расстояния до этой поверхности, но энергетическая яркость при этом не уменьшается, так как уменьшение энергии, попадающей на зрачок, компенсировано пропорциональным уменьшением телесного угла.

Спектральная энергетическая яркость $L(\lambda)$ поверхности со спектральным коэффициентом отражения $R(\lambda)$ может быть рассчитана из спектральной облученности поверхности $E(\lambda)$ по формуле 3.1, при условии, что поверхность является ламбертовским рассеивателем (т.е. имеет равновеликую энергетическую яркость по всем направлениям):

$$L(\lambda) = \frac{R(\lambda)E(\lambda)}{\pi} \quad (3.1)$$

Спектральное распределение энергии (см. рис. 3.2) — это график или таблица радиометрических величин как функция от длины волны. Поскольку абсолютные уровни энергии источников света могут меняться в широком диапазо-

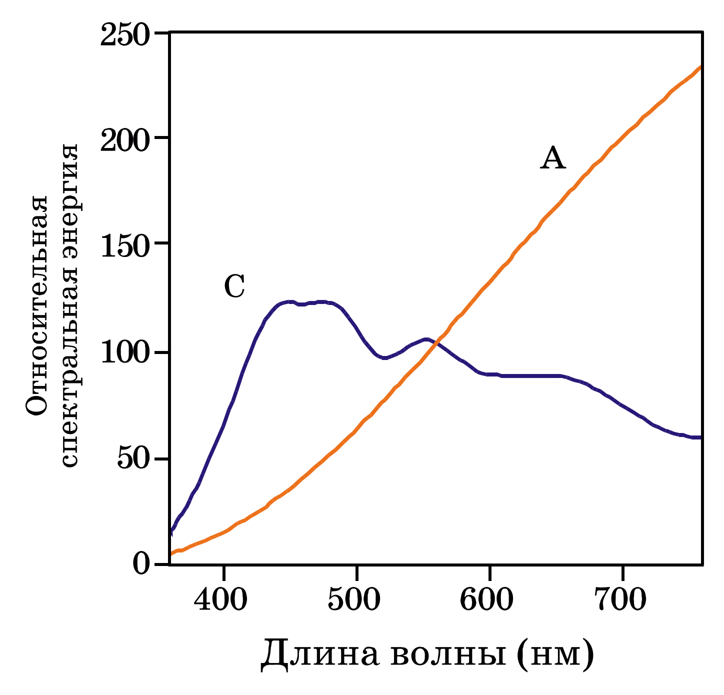


Рис. 3.2 Относительные спектральные распределения энергии CIE-осветителей A и C.

не значений, для облегчения сравнения цветовых свойств этих источников спектральное распределение энергии часто нормируют. При традиционной нормировке значение энергии на длине волны 560 нм (примерно посередине видимого спектра) приравнивается к 100 (иногда к 1). Нормированные спектральные распределения энергии безразмерны и называются *относительными спектральными распределениями*.

Абсолютно черные излучатели

Другой важной радиометрической величиной является цветовая температура источника света. Специальным видом теоретического источника света является т.н. абсолютно черный излучатель (излучающее абсолютно черное тело, планковский излучатель), отдающий энергию только за счет нагрева, благодаря чему он является идеальным излучателем энергии. По мере нагрева абсолютно черного тела количество отданной им энергии растет и смещается в сторону коротких длин волн. Спектральное распределение энергии абсолютно черного излучателя описывается уравнением Планка как функция от единственной переменной — абсолютной температуры по Кельвину. Таким образом, если известна абсолютная температура черного тела — известно спектральное распределение излучаемой энергии.

Температура черного тела называется его цветовой температурой, поскольку она однозначно определяет цвет такого источника. Поскольку абсолютно черные излучатели редко встречаются вне специализированных лабораторий, показатель цветовой температуры малополезен и чаще используется другой показатель — коррелированная цветовая температура.

Источник света не обязательно должен являться абсолютно черным излучателем, чтобы ему могла быть присвоена коррелированная цветовая температура. Коррелированная цветовая температура источника света (Correlated Color Temperature — CCT) — это цветовая температура абсолютно черного излучателя, при которой его цвет ближе всего к цвету исследуемого источника, к примеру: лампы накаливания могут иметь CCT 2800 К, типичная флуоресцентная трубка — 4000 К, усредненный дневной свет — 6500 К, белая точка компьютерного графического дисплея — 9300 К. Если коррелированная цветовая температура источника растет, он будет синее; если падает — краснее.

CIE-осветители

CIE установила несколько спектральных распределений энергии в качестве CIE-осветителей, предназначенных для колориметрии: A, C, D65, D50, F2, F8 и F11.

CIE-осветитель A представляет собой планковский излучатель с цветовой температурой 2856 К и используется для колориметрических вычислений, когда нас интересует освещение лампами накаливания.

CIE-осветитель C — это спектральное распределение A-осветителя, моди-

фицированное специфическими жидкостными фильтрами, утвержденными CIE, и представляющее собой имитатор дневного света с CCT 6774 К.

CIE-осветители D65 и *D50* входят в D-серию осветителей, которые основаны на статистике большого числа измерений реального дневного света. D65-осветитель представляет собой усредненный дневной свет с CCT 6504 К, а D50 — усредненный дневной свет с CCT 5003 К. D65, как правило, используется в колориметрии, D50 — в полиграфии. CIE D-осветители с иными коррелированными цветовыми температурами достаточно легко рассчитать.

CIE-осветители F (общим числом 12) представляют собой типичные спектральные распределения флуоресцентных источников различных видов. CIE-осветитель F2 представляет собой «холодный» флуоресцентный белый с CCT 4230 К, F8 — это флуоресцентный D50-имитатор с CCT 5000 К, а F11 — трехполосный флуоресцентный источник с CCT 4000 К. Трехполосные флуоресцентные источники очень популярны — они производительны, эффективны и отличаются зрительно-комфортным цветовоспроизведением.

Равноэнергетический осветитель (иногда его называют *E-осветитель*) весьма удобен для математических расчетов, потому что ему назначено относительное спектральное распределение энергии, равное 100.0 по всем длинам волн.

Таблица 3.1 содержит спектральные распределения энергии и рабочие колориметрические данные для упомянутых CIE-осветителей, а относительные спектральные распределения этих осветителей в виде графиков показаны на рис. 3.2–3.4.

Таблица 3.1 Относительные спектральные распределения энергии и колориметрические данные нескольких CIE-осветителей. Колориметрические данные — это данные для 2°-го стандартного колориметрического наблюдателя CIE 1931.

Длина волны	A	C	D65	D50	F2	F8	F11
360	6.14	12.90	46.64	23.94	0.00	0.00	0.00
365	6.95	17.20	49.36	25.45	0.00	0.00	0.00
370	7.82	21.40	52.09	26.96	0.00	0.00	0.00
375	8.77	27.50	51.03	25.72	0.00	0.00	0.00
380	9.80	33.00	49.98	24.49	1.18	1.21	0.91
385	10.90	39.92	52.31	27.18	1.48	1.50	0.63
390	12.09	47.40	54.65	29.87	1.84	1.81	0.46
395	13.35	55.17	68.70	39.59	2.15	2.13	0.37
400	14.71	63.30	82.75	49.31	3.44	3.17	1.29
405	16.15	71.81	87.12	52.91	15.69	13.08	12.68
410	17.68	80.60	91.49	56.51	3.85	3.83	1.59
415	19.29	89.53	92.46	58.27	3.74	3.45	1.79
420	21.00	98.10	93.43	60.03	4.19	3.86	2.46
425	22.79	105.80	90.06	58.93	4.62	4.42	3.33
430	24.67	112.40	86.68	57.82	5.06	5.09	4.49

Длина волны	A	C	D65	D50	F2	F8	F11
435	26.64	117.75	95.77	66.32	34.98	34.10	33.94
440	28.70	121.50	104.87	74.82	11.81	12.42	12.13
445	30.85	123.45	110.94	81.04	6.27	7.68	6.95
450	33.09	124.00	117.01	87.25	6.63	8.60	7.19
455	35.41	123.60	117.41	88.93	6.93	9.46	7.12
460	37.81	123.10	117.81	90.61	7.19	10.24	6.72
465	40.30	123.30	116.34	90.99	7.40	10.84	6.13
470	42.87	123.80	114.86	91.37	7.54	11.33	5.46
475	45.52	124.09	115.39	93.24	7.62	11.71	4.79
480	48.24	123.90	115.92	95.11	7.65	11.98	5.66
485	51.04	122.92	112.37	93.54	7.62	12.17	14.29
490	53.91	120.70	108.81	91.96	7.62	12.28	14.96
495	56.85	116.90	109.08	93.84	7.45	12.32	8.97
500	59.86	112.10	109.35	95.72	7.28	12.35	4.72
505	62.93	106.98	108.58	96.17	7.15	12.44	2.33
510	66.06	102.30	107.80	96.61	7.05	12.55	1.47
515	69.25	98.81	106.30	96.87	7.04	12.68	1.10
520	72.50	96.90	104.79	97.13	7.16	12.77	0.89
525	75.79	96.78	106.24	99.61	7.47	12.72	0.83
530	79.13	98.00	107.69	102.10	8.04	12.60	1.18
535	82.52	99.94	106.05	101.43	8.88	12.43	4.90
540	85.95	102.10	104.41	100.75	10.01	12.22	39.59
545	89.41	103.95	104.23	101.54	24.88	28.96	72.84
550	92.91	105.20	104.05	102.32	16.64	16.51	32.61
555	96.44	105.67	102.02	101.16	14.59	11.79	7.52
560	100.00	104.11	100.00	100.00	16.16	11.76	2.83
565	103.58	102.30	98.17	98.87	17.56	11.77	1.96
570	107.18	100.15	96.33	97.74	18.62	11.84	1.67
575	110.80	97.80	96.06	98.33	21.47	14.61	4.43
580	114.44	95.43	95.79	98.92	22.79	16.11	11.28
585	118.08	93.20	92.24	96.21	19.29	12.34	14.76
590	121.73	91.22	88.69	93.50	18.66	12.53	12.73
595	125.39	89.70	89.35	95.59	17.73	12.72	9.74
600	129.04	88.83	90.01	97.69	16.54	12.92	7.33
605	132.70	88.40	89.80	98.48	15.21	13.12	9.72
610	136.35	88.19	89.60	99.27	13.80	13.34	55.27
615	139.99	88.10	88.65	99.16	12.36	13.61	42.58
620	143.62	88.06	87.70	99.04	10.95	13.87	13.18
625	147.24	88.00	85.49	97.38	9.65	14.07	13.16
630	150.84	87.86	83.29	95.72	8.40	14.20	12.26
635	154.42	87.80	83.49	97.29	7.32	14.16	5.11

Длина волны	A	C	D65	D50	F2	F8	F11
640	157.98	87.99	83.70	98.86	6.31	14.13	2.07
645	161.52	88.20	81.86	97.26	5.43	14.34	2.34
650	165.03	88.20	80.03	95.67	4.68	14.50	3.58
655	168.51	87.90	80.12	96.93	4.02	14.46	3.01
660	171.96	87.22	80.21	98.19	3.45	14.00	2.48
665	175.38	86.30	81.25	100.60	2.96	12.58	2.14
670	178.77	85.30	82.28	103.00	2.55	10.99	1.54
675	182.12	84.00	80.28	101.70	2.19	9.98	1.33
680	185.43	82.21	78.28	99.13	1.89	9.22	1.46
685	188.70	80.20	74.00	93.26	1.64	8.62	1.94
690	191.93	78.24	69.72	87.38	1.53	8.07	2.00
695	195.12	76.30	70.67	89.49	1.27	7.39	1.20
700	198.26	74.36	71.61	91.60	1.10	6.71	1.35
705	201.36	72.40	72.98	92.25	0.99	6.16	4.10
710	204.41	70.40	74.35	92.89	0.88	5.63	5.58
715	207.41	68.30	67.98	84.87	0.76	5.03	2.51
720	210.37	66.30	61.60	76.85	0.68	4.46	0.57
725	213.27	64.40	65.74	81.68	0.61	4.02	0.27
730	216.12	62.80	69.89	86.51	0.56	3.66	0.23
735	218.92	61.50	72.49	89.55	0.54	3.36	0.21
740	221.67	60.20	75.09	92.58	0.51	3.09	0.24
745	224.36	59.20	69.34	85.40	0.47	2.85	0.24
750	227.00	58.50	63.59	78.23	0.47	2.65	0.20
755	229.59	58.10	55.01	67.96	0.43	2.51	0.24
760	232.12	58.00	46.42	57.69	0.46	2.37	0.32
X	109.85	98.07	95.05	96.42	99.20	96.43	100.96
Y	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Z	35.58	118.23	108.88	82.49	67.40	82.46	64.37
x	0.4476	0.3101	0.3127	0.3457	0.3721	0.3458	0.3805
y	0.4074	0.3162	0.3290	0.3585	0.3751	0.3586	0.3769
CCT	2856 K	6800 K	6504 K	5003 K	4230 K	5000 K	4000 K

3.4 ОКРАСКА МАТЕРИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Когда источник освещения (или осветитель) известны, то следующий шаг в колориметрии материальных объектов — это характеризация их взаимодействия с видимой лучистой энергией, что иллюстрирует второй угол треугольника на рис. 3.1. Существует лишь три варианта взаимодействия лучистой энергии с материальными объектами: поглощение, отражение и пропускание. Такое взаимодействие подчиняется закону сохранения энергии, то есть сумма поглощенной, отраженной и пропущенной лучистой энергии должна быть равна

сумме падающей энергии по каждой из длин волн, согласно уравнению 3.2, где $\Phi(\lambda)$ — это поток лучистой энергии, $R(\lambda)$ — отраженный поток, $T(\lambda)$ — пропущенный поток и $A(\lambda)$ — поглощенный поток.

$$\Phi(\lambda) = R(\lambda) + T(\lambda) + A(\lambda) \tag{3.2}$$

Отражение, передача и поглощение — это явления, возникающие при взаимодействии света с веществом. Способности к отражению, пропусканию и поглощению — это измеряемые величины, описывающие данное взаимодействие, но поскольку эти величины в сумме всегда должны быть равны падающему потоку, обычно их измеряют относительно — в процентах от падающего потока, а не в абсолютных радиометрических величинах. Таким образом, *отражательную способность* можно определить как отношение отраженной энергии к падающей; *пропускательную способность* — как отношение пропущенной энергии к падающей; и *поглощательную способность* — как отношение поглощенной энергии к падающей.

Отметим, что величины отражательной, пропускательной и поглощательной способностей — это результат относительных радиометрических измерений, которые являются предметом *спектрофотометрии*. Спектрофотометрические величины выражают в виде процентов (0–100%) или коэффициентов (0–1.0).

Рис. 3.5 демонстрирует спектральные коэффициенты отражения, пропускания и поглощения красного полупрозрачного объекта. Отметим, что поскольку эти три величины в сумме дают 100%, то, как правило, нет необходимости в измерении всех трех, к тому же в нашей сфере интерес представляют в основном коэффициенты отражения и пропускания.

К сожалению, для колориметристов взаимодействие лучистой энергии с объектами — это не просто спектральное явление: отражательная или пропускательная способности объекта — это не только функции от длины волны, но также еще и функции от геометрий освещения и просмотра. Сказанное можно проиллюстрировать явлением глянца: представьте себе матовый, полуглянцевый и глянцевый фотоотпечатки или рисунки — различную степень глянца этих материалов можно отнести на счет геометрического распределения зеркального коэффициента отражения поверхности объекта.

Вот один из примеров влияния геометрических эффектов на восприятие: существует множество вариантов покраски автомобилей, дающих различные интересные изменения в цвете при изменении освещения и геометрии наблюдения — «металлик», «жемчуг» и прочие «эффектные» покрытия. Для полного количественного описания этих эффектов строятся т.н. функции двунаправленного распределения коэффициента отражения или пропускания (bidirectional reflectance distribution functions — BRDF), которые должны быть получены для каждой возможной комбинации угла освещения, угла обзора и длины волны. Измерение таких функций невероятно сложно, очень дорого и создает огромный массив данных, который, в свою очередь, трудно обработать: поэтому, чтобы избежать переизбытка данных, для колориметрии было опреде-

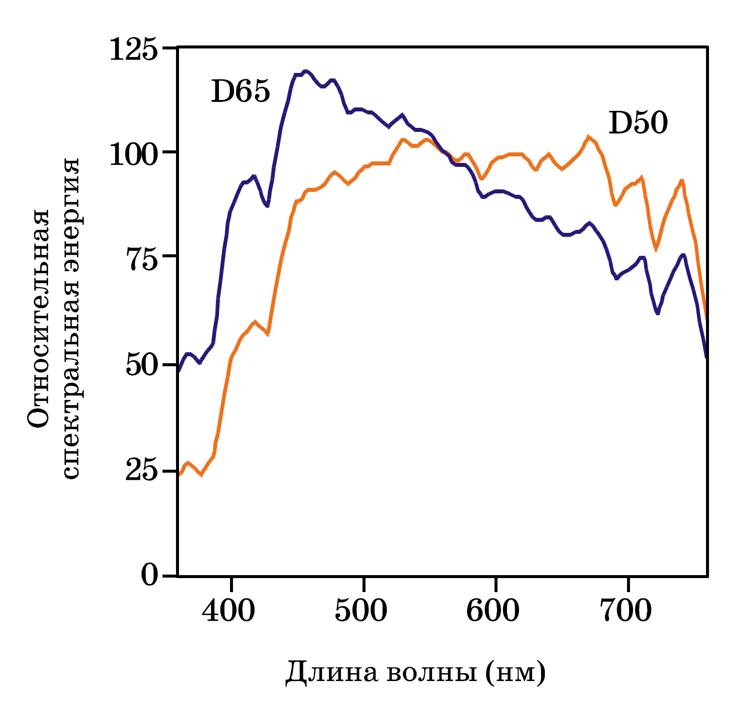


Рис. 3.3 Относительные спектральные распределения энергии CIE-осветителей D50 и D65.

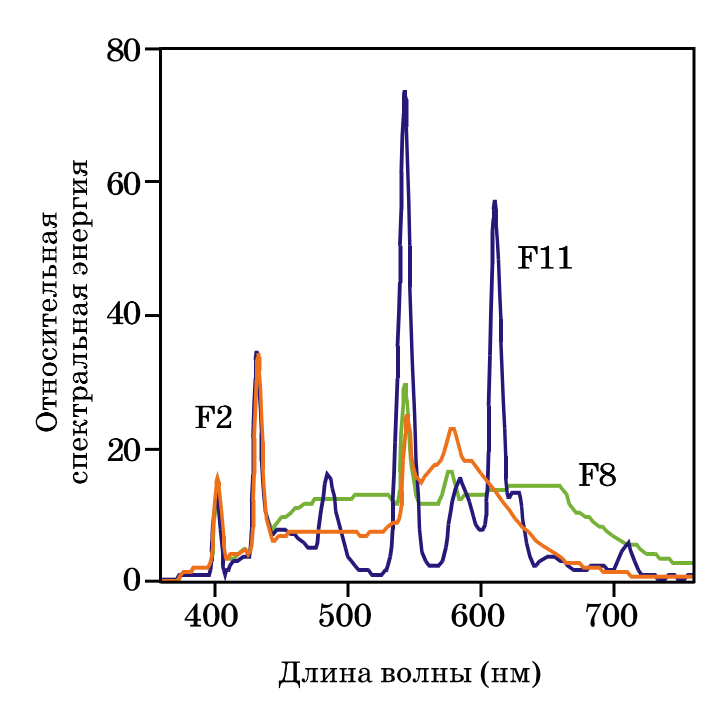


Рис. 3.4 Относительные спектральные распределения энергии CIE-осветителей F2, F8 иF11.

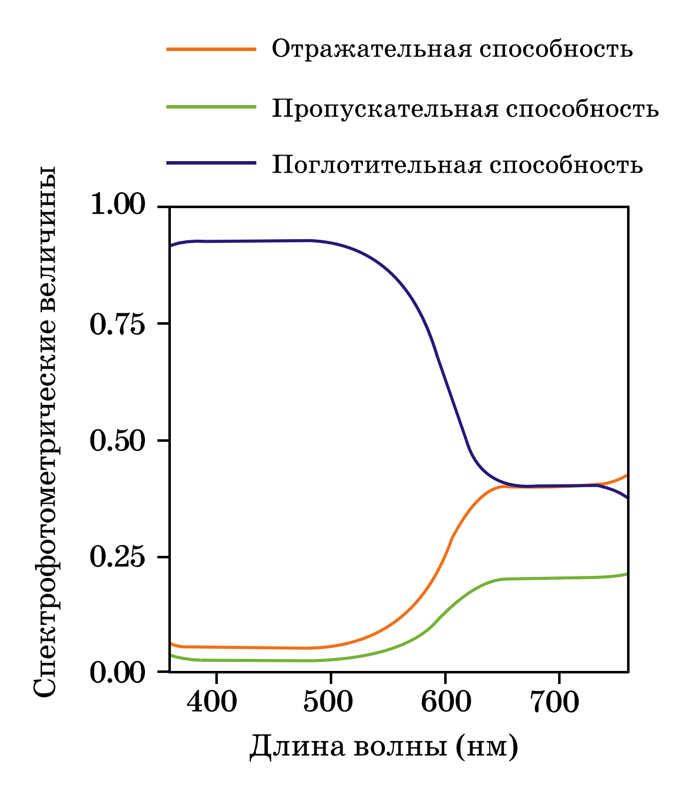


Рис. 3.5 Спектральные поглощательная, отражательная и пропускательная способности красного полупрозрачного пластиково материала.

лено строго ограниченное количество стандартных вариантов геометрий освещения и наблюдения.

CIE-геометрии освещения и наблюдения

В свое время для спектрометрических измерений на отражение CIE определила четыре стандартных вида геометрии освещения и четыре стандартных вида геометрии наблюдения (подробнее см. Публикацию CIE 15.3), которые позиционированы как две пары оптически обратимых конфигураций:

1. Рассеянный/нормаль (d/0) и нормаль/рассеянный (0/d).
2. 45/нормаль (45/0) и нормаль/45 (0/45).

Вначале указывается геометрия освещения, а затем (через слэш) — геометрия наблюдения.

d/0- и 0/d-геометрии измерения

При d/0-геометрии образец освещен под всеми углами с помощью т.н. фотометрического шара и рассматривается по нормали к поверхности или под углом близким к ней.

При 0/d-геометрии образец освещен по нормали (или под углом близким к ней), а отраженная энергия собирается со всех углов с помощью фотометрического шара.

Оба вида геометрии взаимно обратимы и поэтому дают одинаковые результаты (при условии, что все прочие инструментальные параметры неизменны).

Отметим, что измерения по описанным вариантам геометрии производятся только на отражение и у многих приборов в той области фотометрического шара, которая отвечает за угол зеркального (прямого) отражения освещения при 0/d-геометрии (или же за угол, при котором зеркальное отражение возникает при d/0-геометрии), установлена специальная черная ловушка, исключающая зеркальный компонент отражения, благодаря чему измеряется только диффузный коэффициент отражения. Такие измерения называют «измерениями с исключенным зеркальным компонентом» (в противоположность измерениям с «включенным зеркальным компонентом», то есть выполненным без использования черной ловушки).

45/0- и 0/45-геометрии измерения

Вторая пара вариантов геометрии измерения — это 45/нормаль (45/0) и нормаль/45 (0/45).

При 45/0-геометрии образец освещен одним или несколькими источниками света, падающего под углом 45° к нормали, а измерения производятся по нормали.

При 0/45-геометрии образец освещен по нормали к поверхности, а измерения проводятся под углом 45° одним или несколькими датчиками.

И вновь геометрии взаимно обратимы и дают одинаковые результаты независимо от конструкции приборов. Использование геометрий 45/0 и 0/45 гарантирует, что все компоненты глянца исключены из измерений, и поэтому данные варианты геометрии измерения используются в тех ситуациях, при которых требуется сравнение цветовых стимулов, получаемых от поверхностей с разным уровнем глянца (к примеру, в полиграфии и фотографии). Отметим, что при получении колориметрических данных от различных материалов крайне важно обращать внимание на геометрию инструмента.

Определение коэффициента отражения как отношения отраженной энергии к падающей полностью подходит к измерениям коэффициента полного отражения (d/0 или 0/d), однако для двунаправленных измерений коэффициента отражения (45/0 и 0/45) отношение отраженной энергии к упавшей исключительно маленькое (так как отраженная энергия регистрируется в малом диапазоне углов), поэтому для получения значений, пригодных для практического использования, при обоих вариантах двунаправленной геометрии измерения коэффициент отражения рассчитывается относительно идеального отражающего рассеивателя.

Идеальный отражающий рассеиватель (Perfect Reflecting Diffuser — PRD) — это теоретическая поверхность, которая одновременно является и идеально отражающей (коэффициент отражения равен 100%), и идеально ламбертовской (энергетическая яркость одинакова по всем направлениям). Поэтому коэффициент отражения определяется как отношение энергии, отраженной от образца, к энергии, которая была бы отражена идеальным отражающим рассеивателем, освещенным и рассматриваемым при идентичной геометрии.

При использовании фотометрического шара коэффициент полного отражения равен отражательной способности, а при двунаправленных вариантах геометрии коэффициент отражения, измеренный относительно PRD по 0–1-шкале, лишь подобен коэффициенту полного отражения.

Поскольку PRD физически не существует, национальными лабораториями по стандартизации (такими, как NIST — Национальный институт по стандартизации и технологии в США), а также производителями измерительных приборов выполнены стандартные эталоны, которые калиброваны относительно теоретической мишени — PRD.

Флуоресценция

Один из последних важных моментов в колориметрическом анализе материалов — это явление флуоресценции.

Флуоресцентные материалы подчиняются закону сохранения энергии согласно уравнению 3.2, однако особенность их поведения в том, что, поглотив энергию в определенном диапазоне длин волн, они затем отдают эту энергию в диапазоне, как правило, смещенном в сторону более длинных волн, к примеру: флуоресцентный оранжевый материал может поглотить «синюю» энергию и отдать ее как «оранжевую».

Полная трактовка цветового измерения флуоресцентных материалов сложна и не входит в задачу данной книги, но в целом флуоресцентные материалы характеризуются полным коэффициентом отражения, который является отношением суммы отраженной и излученной энергий по каждой длине волны к энергии, которая была бы отражена от PRD. Данное отношение допускает возможность превышения коэффициентом полного отражения 1.0, что чаще всего и случается. Важно отметить, что коэффициент полного отражения в данном случае зависит от источника света измерительного прибора, поскольку количество испущенной энергии прямо пропорционально количеству поглощенной энергии в активном участке длин волн.

Спектрофотометрические измерения отражательной или пропускательной способностей нефлуоресцентных материалов нечувствительны к характеристикам источника света прибора, так как эти характеристики нормируются при вычислениях, и это важное отличие лишний раз подчеркивает особую сложность измерений флуоресцентных материалов. К сожалению, многие искусственные материалы (такие, как бумаги и краски) флуоресцентны, из-за чего с трудом поддаются точному измерению.

3.5 ОТВЕТ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

Спектральное измерение (или стандартизация) источников света и материалов обеспечивает необходимую для колориметрии физическую информацию, но дело прогнозирования ответа зрительной системы человека (см. третий угол треугольника на рис. 3.1) остается за количественными методами оценки этой информации.

Следуя определению базовой колориметрии, данному Вышецким (1973), ко-

личественное описание ответа зрительной системы человека через психофизику цветовых соответствий сосредоточено на первичном уровне зрения (то есть на уровне поглощения энергии колбочковыми фоторецепторами). Являясь базисом колориметрии, возможность спрогнозировать, будут ли два стимула визуально соответствовать друг другу для усредненного наблюдателя, приносит колоссальную пользу в различных сферах своего применения, и несмотря на то, что эта система не описывает цветовое восприятие как таковое, она создает фундамент для его описания и позволяет прогнозировать соответствия (что востребовано в разных сферах деятельности), а также обеспечивает необходимый промышленный инструментарий для установки допусков на эти соответствия.

Способность зрительной системы человека к выявлению цветовых соответствий определяется спектральной чувствительностью трех типов колбочек: как только энергия поглощена колбочками — информация о спектральном происхождении сигнала утрачивается, и если сигналы от колбочек трех типов одинаковы в ответ на два стимула, эти стимулы неизбежно будут соответствовать друг другу по цвету, когда просматриваются в одинаковых условиях, то есть, когда в зрительную систему не попадает никакой лишней информации, приводящей к возникновению визуальных отличий. Таким образом, если известны спектральные чувствительности трех типов колбочек, то два стимула с известными спектральными распределениями энергии $\Phi_1(\lambda)$ и $\Phi_2(\lambda)$ будут соответствовать друг другу по цвету, в случае если спектральное распределение энергии этих стимулов и каждая из трех колбочковых чувствительностей — $L(\lambda)$, $M(\lambda)$ и $S(\lambda)$, проинтегрированные по длинам волн, — равны. Данное равенство проиллюстрировано уравнениями 3.3–3.5: два стимула соответствуют друг другу по цвету, если все три равенства в этих формулах истинны.

$$\int_\lambda \Phi_1(\lambda)L(\lambda)\mathrm{d}\lambda = \int_\lambda \Phi_2(\lambda)L(\lambda)\mathrm{d}\lambda \quad (3.3)$$

$$\int_\lambda \Phi_1(\lambda)M(\lambda)\mathrm{d}\lambda = \int_\lambda \Phi_2(\lambda)M(\lambda)\mathrm{d}\lambda \quad (3.4)$$

$$\int_\lambda \Phi_1(\lambda)S(\lambda)\mathrm{d}\lambda = \int_\lambda \Phi_2(\lambda)S(\lambda)\mathrm{d}\lambda \quad (3.5)$$

Уравнения 3.3–3.5 иллюстрируют определение метамеризма, и поскольку для достижения цветового соответствия равными между собой должны быть три пары интегралов, то нет необходимости в том, чтобы спектральные распределения энергии стимулов были бы равны между собой по каждой из длин волн. Сегодня спектральные чувствительности колбочек хорошо известны (см. главу 1), что делает систему базовой колориметрии почти столь же простой, как и сами уравнения 3.3–3.5. Однако достаточно точные сведения о спектральных чувствительностях колбочек — это лишь недавнее научное достижение, тогда как потребность колориметрии в них возникла за несколько десятилетий до того, как были получены необходимые данные: поэтому в 1931 г. CIE, создавая колориметрическую систему, шла не столь легким и прямым путем.

Фотометрическая система

Чтобы проиллюстрировать относительный характер колориметрической системы CIE, полезно сперва обратиться к фотометрии, которая как наука была утверждена в 1924 г. Целью фотометрии являлось создание спектрально-взвешивающей функции, пригодной для описания восприятия яркостных соответствий, т.е. система описывала результаты т.н. фликкерных фотометрических экспериментов (экспериментов с мерцающими стимулами), но не гетерохроматические яркостные соответствия (см. главу 6).

В 1924 г. CIE установила функцию спектральной световой эффективности $V(\lambda)$ для фотопического зрения. Эта функция (показана в виде графика на рис. 3.6 и в виде массива чисел в таблице 3.2) демонстрирует то, что при восприятии яркости зрительная система человека наиболее чувствительна в области средних длин волн и становится все менее и менее чувствительной по мере приближения к концам видимого спектра. Функция $V(\lambda)$ используется как спектрально-взвешивающая и предназначена для конверсии радиометрических величин в величины фотометрические посредством спектрального интегрирования по формуле 3.6:

$$\Phi_V = \int_\lambda \Phi(\lambda) V(\lambda) \mathrm{d}\lambda \qquad (3.6)$$

Φ_V в данном уравнении относится к соответствующей фотометрической величине, вычисляемой с помощью радиометрической величины $\Phi(\lambda)$, к примеру: радиометрические величины облученности, энергетической яркости и отражательной способности используются для получения фотометрических величин освещенности (люмен/м^2 или lux), яркости (cd/m^2) или коэффициента яркости (безразмерен). Все оптические свойства облученности и энергетической яркости, а также характер взаимоотношений между ними, сохраняются и у освещенности, и у фотометрической яркости. Для сохранения соответствующих единиц при конверсии облученности и энергетической яркости в освещенность и яркость требуется нормирующий коэффициент, равный 683 люмен/Ватт, но для вычисления коэффициента яркости необходим иной тип нормировки, описанный в следующем разделе.

Ясно, что колбочковые ответы не могут быть описаны одной только функцией $V(\lambda)$, согласно оппонентной теории цветового зрения такое вообще невозможно: оппонентная теория учит, что функция $V(\lambda)$ передает взвешенную сумму трех функций колбочковой чувствительности. Когда колбочковые функции взвешены согласно относительной колбочковой населенности сетчатки, а затем суммированы, — общая чувствительность соответствует функции CIE 1924 $V(\lambda)$. Таким образом, фотопические световые ответы представляют собой комбинацию колбочковых сигналов, которая представлена в полной колориметрической системе. Использование спектрально-взвешивающей функции для прогноза соответствий по фотометрической яркости — это первый шаг к единой колориметрической системе.

Функция световой эффективности для скотопического (палочкового) зрения

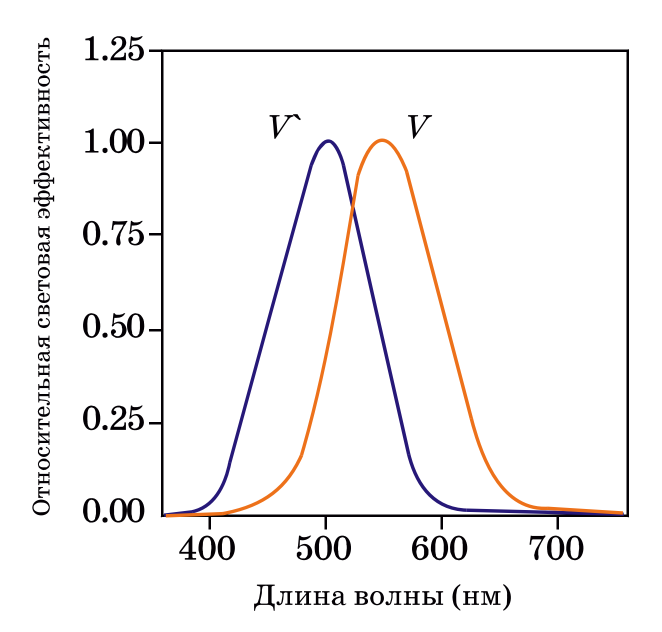


Рис. 3.6 Скотопическая — $V'(\lambda)$ и фотопическая — $V(\lambda)$ функции CIE.

именуется функцией $V'(\lambda)$ (показана на графике рис. 3.6 и в таблице 3.2 вместе с $V(\lambda)$-функцией); $V'(\lambda)$ используется в фотометрии при очень низких уровнях яркости. Поскольку существует только один вид палочковых фоторецепторов, функция $V'(\lambda)$ точно передает спектральную чувствительность палочек. Рис. 3.6 иллюстрирует сдвиг пика спектральной чувствительности в направлении коротких длин волн по мере перехода от фотопического к скотопическому зрению. Этот сдвиг, называемый сдвигом Пуркине, объясняет, почему при очень низких уровнях яркости синие объекты кажутся светлее, чем красные. Отметим, что функция $V'(\lambda)$ идет по кривой, подобной функции $V(\lambda)$.

В науке о зрении долгое время считалось, что функция $V(\lambda)$ неточна в области коротких волн, поэтому в 1988 г. для практического решения этой проблемы CIE приняла дополнительную функцию световой эффективности $V_M(\lambda)$ [CIE, 1990].

Таблица 3.2 CIE-функции фотопической световой эффективности — $V(\lambda)$ и скотопической световой эффективности — $V'(\lambda)$.

Длина волны (нм)	$V(\lambda)$	$V'(\lambda)$	Длина волны (нм)	$V(\lambda)$	$V'(\lambda)$
360	0.0000	0.0000	560	0.9950	0.3288
365	0.0000	0.0000	565	0.9786	0.2682
370	0.0000	0.0000	570	0.9520	0.2076
375	0.0000	0.0000	575	0.9154	0.1644
380	0.0000	0.0006	580	0.8700	0.1212
385	0.0001	0.0014	585	0.8163	0.0934
390	0.0001	0.0022	590	0.7570	0.0655

395	0.0002	0.0058	595	0.6949	0.0494
400	0.0004	0.0093	600	0.6310	0.0332
405	0.0006	0.0221	605	0.5668	0.0246
410	0.0012	0.0348	610	0.5030	0.0159
415	0.0022	0.0657	615	0.4412	0.0117
420	0.0040	0.0966	620	0.3810	0.0074
425	0.0073	0.1482	625	0.3210	0.0054
430	0.0116	0.1998	630	0.2650	0.0033
435	0.0168	0.2640	635	0.2170	0.0024
440	0.0230	0.3281	640	0.1750	0.0015
445	0.0298	0.3916	645	0.1382	0.0011
450	0.0380	0.4550	650	0.1070	0.0007
455	0.0480	0.5110	655	0.0816	0.0005
460	0.0600	0.5670	660	0.0610	0.0003
465	0.0739	0.6215	665	0.0446	0.0002
470	0.0910	0.6760	670	0.0320	0.0001
475	0.1126	0.7345	675	0.0232	0.0001
480	0.1390	0.7930	680	0.0170	0.0001
485	0.1693	0.8485	685	0.0119	0.0000
490	0.2080	0.9040	690	0.0082	0.0000
495	0.2586	0.9430	695	0.0057	0.0000
500	0.3230	0.9820	700	0.0041	0.0000
505	0.4073	0.9895	705	0.0029	0.0000
510	0.5030	0.9970	710	0.0021	0.0000
515	0.6082	0.9660	715	0.0015	0.0000
520	0.7100	0.9350	720	0.0010	0.0000
525	0.7932	0.8730	725	0.0007	0.0000
530	0.8620	0.8110	730	0.0005	0.0000
535	0.9149	0.7305	735	0.0004	0.0000
540	0.9540	0.6500	740	0.0002	0.0000
545	0.9803	0.5655	745	0.0002	0.0000
550	0.9950	0.4810	750	0.0001	0.0000
555	1.0000	0.4049	755	0.0001	0.0000
			760	0.0001	0.0000

3.6 ТРЕХСТИМУЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ И ФУНКЦИИ ЦВЕТОВОГО СООТВЕТСТВИЯ

После принятия CIE в 1924 г. функции световой эффективности $V(\lambda)$ внимание было сосредоточено на развитии колориметрической системы, задачей которой являлось описание метамерных стимулов, соответствующих друг другу по цвету при восприятии их усредненным наблюдателем. Поскольку данные о колбочковых чувствительностях в то время были недоступны, колориметрическая система конструктивно основана на принципах трихромазии и грассмановских законах аддитивного смешения цветовых стимулов. Концепция этой системы состоит в том, что цветовые соответствия могут быть описаны как количества трех аддитивных первичных световых потоков — primaries[1], необходимых для достижения визуального соответствия тому или иному стимулу. Сказанное иллюстрирует формула 3.7:

$$C \equiv R(\mathcal{R}) + G(\mathcal{G}) + B(\mathcal{B}) \tag{3.7}$$

Формула 3.7 читается так: цвету C соответствует R единиц кардинального стимула $\mathcal{R}$, G единиц кардинального стимула $\mathcal{G}$ и B единиц кардинального стимула $\mathcal{B}$. Аббревиатура $\mathcal{RGB}$ определяет специфичность набора кардинальных стимулов и указывает на то, что при различных наборах кардинальных стимулов понадобятся различные количества этих кардинальных стимулов.

Аббревиатура RGB указывает на необходимые количества кардинальных стимулов, известные как «трехстимульные значения» (tristimulus values). Таким образом, любой цвет может быть визуально уравнен точными количествами трех кардинальных стимулов, и, следовательно, эти количества (трехстимульные значения), в совокупности с характеристиками самого набора кардинальных стимулов, позволяют специфицировать цвет. Если у двух стимулов одинаковые трехстимульные значения — это означает, что они будут визуально соответствовать друг другу в одинаковых условиях просмотра.

Трехстимульные значения любых стимулов

Следующий шаг в развитии колориметрии — это обеспечение возможности получения трехстимульных значений для любого стимула с известным спектральным распределением энергии. Этот шаг состоит из двух этапов.

Первый этап: получение трехстимульных значений, соответствующих монохроматическим стимулам.

Второй этап: суммирование (на основе грассмановских законов аддитивности и пропорциональности) трехстимульных значений по каждому компоненту спектрального распределения энергии исследуемого стимула и получение интегрированных трехстимульных значений этого стимула.

[1] Согласно оригинальной лексике CIE «primaries» далее будут переводиться как «кардинальные стимулы» (cardinal stimuli). — *Прим. пер.*

Трехстимульные значения спектральных компонентов всего видимого спектра (то есть спектральные трехстимульные значения) были получены путем визуального сравнения единичных спектральных стимулов по каждой длине волны с аддитивной смесью трех кардинальных стимулов. На рис. 3.7 показан набор спектральных трехстимульных значений для монохроматических кардинальных стимулов с длинами волн 435.6 ($\mathcal{B}$), 546.1 ($\mathcal{G}$) и 700.0 нм ($\mathcal{R}$). Комплект спектральных трехстимульных значений для полного спектра называют *функциями цветового соответствия*.

Отметим, что некоторые из спектральных трехстимульных значений на рис. 3.7 отрицательны, что подразумевает участие в сравнении отрицательных количеств энергии, к примеру: отрицательное значение $\mathcal{R}$-кардинального стимула необходимо для уравнивания монохроматического стимула с длиной волны 500 нм. Так происходит потому, что узкополосные стимулы слишком насыщенны, чтобы быть уравненными специфическими кардинальными стимулами (то есть они лежат вне цветового охвата тройки кардинальных стимулов). Ясно, что отрицательное количество света добавить невозможно, поэтому отрицательные трехстимульные значения были получены добавкой того или иного кардинального стимула к монохроматическому (исследуемому) свету для понижения насыщенности последнего и компрессии его в цветовой охват тройки кардинальных стимулов. Таким образом, монохроматический стимул с длиной волны 500 нм, смешанный с определенным количеством $\mathcal{R}$-кардинального стимула, оказывается уравненным с аддитивной смесью соответствующих количеств $\mathcal{G}$- и $\mathcal{B}$-кардинальных стимулов. Функции цветового соответствия, показанные на рис. 3.7, демонстрируют значения кардинальных стимулов, необходимые для уравнивания с монохроматическими стимулами каждой из длин волн видимого спектра.

Полагая, что спектральное распределение энергии любого произвольно взятого стимула — это аддитивная смесь различных количеств монохроматических стимулов, трехстимульные значения данного стимула можно получить умножением функций цветового соответствия на величину энергии исследуемого стимула по каждой из длин волн (грассмановская пропорциональность) с последующим интегрированием результатов умножения (грассмановская аддитивность). Таким образом, общие формулы для вычисления трехстимульных значений стимула со спектральным распределением энергии $\Phi(\lambda)$ представляют собой формулы 3.8–3.10, где $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ — это функции цветового соответствия.

$$R = \int_{\lambda} \Phi(\lambda)\bar{r}(\lambda)\mathrm{d}\lambda \tag{3.8}$$

$$G = \int_{\lambda} \Phi(\lambda)\bar{g}(\lambda)\mathrm{d}\lambda \tag{3.9}$$

$$B = \int_{\lambda} \Phi(\lambda)\bar{b}(\lambda)\mathrm{d}\lambda \tag{3.10}$$

Вычислив трехстимульные значения и функции цветового соответствия, остается получить репрезентативный набор функций цветового соответствия для

большинства наблюдателей с нормальным цветовым зрением. Поскольку функции цветового соответствия для отдельных наблюдателей с нормальным цветовым зрением могут существенно отличаться друг от друга за счет вариабельности пропускательных способностей хрусталика и макулы, вариабельности оптической плотности колбочек, колбочковой населенности сетчатки, а также спектральной чувствительности колбочек, то для того чтобы создать и стандартизировать колориметрическую систему, необходимо получить достоверные усредненные функции цветового соответствия для всех наблюдателей с нормальным цветовым зрением.

Усреднение функций цветового соответствия

В конце 20-х годов прошлого века были выполнены две серии экспериментов по усреднению функций цветового соответствия, которые провели Райт (1928–29), использовавший монохроматические кардинальные стимулы, и Гилд (1931), использовавший широкополосные кардинальные стимулы.

Поскольку кардинальные стимулы первого эксперимента могут быть описаны с помощью трехстимульных значений кардинальных стимулов второго эксперимента, то возможно выполнить линейное (3×3-матричное) преобразование, конвертирующее трехстимульные значения из одной системы в другую. Благодаря тому, что преобразование с успехом применимо к функциям цветового соответствия (поскольку они представляют собой набор самостоятельных трехстимульных значений), было выполнено преобразование, объединяющее данные Райта и Гилда в общий набор кардинальных стимулов.

Эксперименты Райта и Гилда оказались исключительно хорошо согласованными и подтвердили теоретические предположения, касающиеся получения и использования функций цветового соответствия, поэтому CIE решила установить стандартный набор функций цветового соответствия, основанный на усредненных результатах обоих экспериментов. Затем полученные функции были преобразованы в функции для набора узкополосных кардинальных стимулов *RGB* с длинами волн 700.0 нм, 546.1 нм и 435.8 нм соответственно (рис. 3.7).

Затем CIE решила выполнить преобразование полученных функций к функциям для еще одного набора кардинальных стимулов — *XYZ*; основной предпосылкой к этому преобразованию было стремление устранить отрицательные значения из функций цветового соответствия и принудительно уравнять одну из этих функций с функцией фотопической световой эффективности $V(\lambda)$ CIE 1924.

Отрицательные значения были удалены за счет создания такого набора кардинальных стимулов, с помощью которого можно было бы уравнять все физически воспроизводимые цветовые стимулы. Такими кардинальными стимулами оказались лишь воображаемые кардинальные стимулы, более насыщенные, чем монохроматический свет, и их получение — это математическая абстракция. Нужно отметить, что, несмотря на то, что кардинальные стимулы условны, функции цветового соответствия, полученные с такими кардинальными стимулами, основаны на совершенно реальных результатах цветового уравнивания и подчиняются грассмановским законам.

Принудительное уравнивание одной из функций цветового соответствия

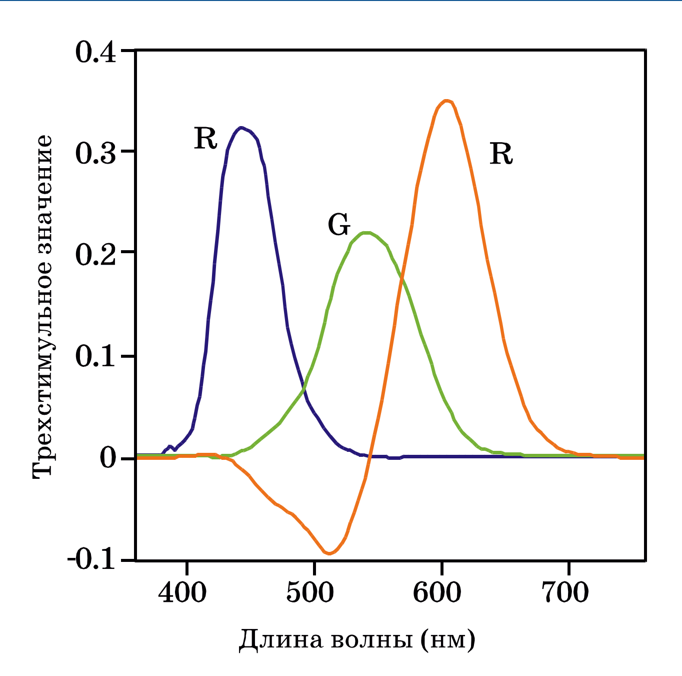


Рис. 3.7 Спектральные трехстимульные значения для колориметрической системы CIE RGB с монохроматическими кардинальными стимулами 435.8, 546.1 и 700.0 нм.

с функцией $V(\lambda)$ выполнено с целью внедрения фотометрической системы CIE (принята в 1924 г.) в колориметрическую систему CIE (принята в 1931 г.). Поступили так: воображаемым кардинальным стимулам ***X*** и ***Z*** был адресован сугубо «неяркостный» ответ, а вся полнота яркостного ответа адресована стимулу ***Y***. Функции цветового соответствия для кардинальных стимулов ***XYZ*** — это $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ соответственно, которые именуются как «функции цветового соответствия стандартного колориметрического наблюдателя CIE 1931». Табличное представление этих функций дано в таблице 3.3, а графическое — на рис. 3.8 в значимом для нас диапазоне длин волн (360–760 нм с шагом 5 нм). (CIE позиционирует функции цветового соответствия в диапазоне от 360 до 830 нм с шагом 1 нм и с множеством десятичных знаков после запятой).

Трехстимульные *XYZ*-значения цветовых стимулов вычисляются аналогично трехстимульным *RGB*-значениям, описанным выше. Общие уравнения даны в формулах 3.11–3.13, где $\Phi(\lambda)$ — спектральное распределение энергии исследуемого стимула; $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ — функции цветового соответствия; k —нормирующий коэффициент.

$$X = k\int_{\lambda} \Phi(\lambda)\bar{x}(\lambda)\mathrm{d}\lambda \tag{3.11}$$

$$Y = k\int_{\lambda} \Phi(\lambda)\bar{y}(\lambda)\mathrm{d}\lambda \tag{3.12}$$

$$Z = k\int_{\lambda} \Phi(\lambda)\bar{z}(\lambda)\mathrm{d}\lambda \tag{3.13}$$

В зависимости от типа стимула его спектральное распределение энергии оп-

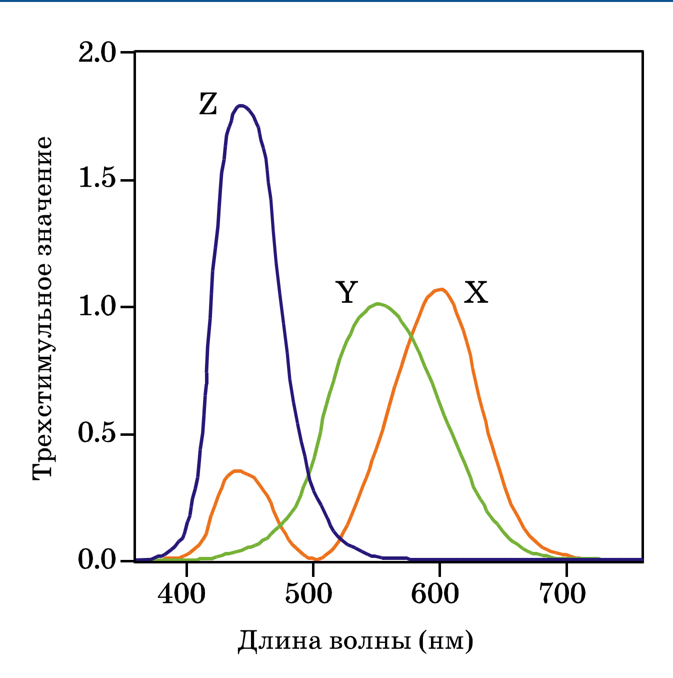


Рис. 3.8 Спектральные трехстимульные значения стандратного колориметрического наблюдателя CIE 1931.

ределяется по-разному: для самосветящихся стимулов (к примеру, источники света и CRT-дисплеи) $\Phi(\lambda)$ — это обычная спектральная энергетическая яркость (относительное спектральное распределение энергии); для отражающих материалов $\Phi(\lambda)$ — это произведение спектрального коэффициента отражения $R(\lambda)$ и относительного спектрального распределения энергии $S(\lambda)$ интересующего источника света или осветителя, то есть $R(\lambda)S(\lambda)$; для пропускающих материалов $\Phi(\lambda)$ — это произведение спектрального коэффициента пропускания материала $T(\lambda)$ и относительного спектрального распределения энергии $S(\lambda)$ интересующего источника света или осветителя, то есть $T(\lambda)S(\lambda)$.

Нормирующий коэффициент k в формулах 3.11–3.13 по-разному определен для т.н. *абсолютной* и *относительной* колориметрий.

В абсолютной колориметрии k равен 683 люмен/Ватт, что обеспечивает совместимость колориметрической системы с фотометрической.

В относительной колориметрии k определен уравнением 3.14:

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda} S(\lambda)\bar{y}(\lambda)\mathrm{d}\lambda} \quad (3.14)$$

В относительной колориметрии нормировка по формуле 3.14 ведет к тому, что трехстимульные значения шкалируются в диапазон от 0 до примерно 100 для различных материалов, и следует отметить, что, когда относительная колориметрия используется для вычисления трехстимульных значений источника света, — трехстимульное значение Y всегда равно 100.

В полиграфии (и прочих цветорепродукционных отраслях) термин «относительная колориметрия» имеет совершенно иной смысл: чаще всего трехсти-

мульные значения интересующего стимула нормируются на трехстимульные значения белой бумаги (а не идеального отражающего рассеивателя)[1] — в результате такой нормировки трехстимульное значение Y становится равным 100, тогда как его типичное значение не более 85. Данный подход хорош тем, что позволяет выполнять преобразование между различными типами бумаг, сохраняя цвет бумаги как самый светлый цвет в изображении, и не следить при этом (в процессе репродуцирования) за сохранностью цвета оригинальной бумаги. Такая практика имеет право на существование, но фактически — это проблема гамут-мэппинга (gamut mapping), а не цветового измерения.

Во избежание путаницы с давно устоявшейся практикой относительной колориметрии наиболее подходящим для упомянутых случаев (полиграфия, фотография и др.) был бы термин «нормированная колориметрия», но стоит отметить, что практика *нормированной колориметрии* не всегда последовательна и непротиворечива. — В некоторых случаях измерения отражательной способности могут выполняться относительно бумаги, что дает гарантию нормировки трехстимульного значения Y в диапазон от 0 (для абсолютно черного) до 1.0 или 100.0 (для бумаги). Однако трехстимульные значения X и Z могут оказаться большими 1.0 (или 100.0), что зависит от специфики источника, использованного в колориметрических вычислениях. Другим подходом является нормировка XYZ-значений каждого цветового стимула на трехстимульные значения бумаги $X_pY_pZ_p$ по отдельности (X/X_p, Y/Y_p и Z/Z_p), что аналогично нормировке белой точки в CIELAB и часто используется для управления белой точкой и для ограничения динамического диапазона в системах, работающих с изображениями.

Отметим, что всегда важно знать, какой именно тип нормированной колориметрии был использован в том или ином случае.

Взаимоотношения между CIE XYZ-трехстимульными значениями и колбочковыми ответами (последние иногда называют *фундаментальными трехстимульными значениями*) чрезвычайно важны и очень интересны в деле моделирования цветового восприятия.

Подобно $V(\lambda)$-функции, каждая из функций цветового соответствия CIE XYZ представляет собой линейную комбинацию колбочковых ответов, поэтому взаимоотношения между функциями цветового соответствия CIE XYZ и колбочковыми ответами определены линейными 3×3-матричными преобразованиями, что подробнее обсуждается в главе 9 (см. рис. 9.1).

О колбочковых спектральных чувствительностях можно говорить как о функциях цветового соответствия для набора кардинальных стимулов, подобранных так, что каждый кардинальный стимул возбуждает колбочки только одного типа. Однако на практике возможно создать реальный кардинальный стимул, возбуждающий только S-колбочки; создать кардинальный стимул, возбуждающий только M- или только L-колбочки, — нереально, поскольку их спектральные чувствительности распределены по всему видимому спектру. Та-

[1] Подробности см. в нормативном ICC-документе «Спецификация ICC.1:2004-10 (Версия профайлов 4.2.0.0) Технология управления цветом в изображениях — архитектура, формат профайлов и структура данных. [Пересмотр 1:2003-09]», опубликованном на www.rudtp.ru, или в англоязычном оригинале на www.color.org. — *Прим. пер.*

ким образом, требуемые кардинальные стимулы, оставаясь лишь воображаемыми, создают функции цветового соответствия только с положительными значениями, но при этом не включают в себя функцию $V(\lambda)$ как функцию цветового соответствия (поскольку требуемые кардинальные стимулы возбуждают колбочки всех трех типов).

Историческое развитие классической колориметрии и недавний прогресс в развитии колориметрических систем, основанных на колбочковых чувствительностях, описан Бойнтоном (1996).

Два комплекта функций цветового соответствия

Важно знать, что существует два набора функций цветового соответствия, принятых CIE.

Стандартный колориметрический наблюдатель CIE 1931 был экспериментально получен с использованием 2°-го поля зрения. Последнее означает, что уравниваемые стимулы попадали на сетчатку исключительно в пределах ее центральной ямки. Функции цветового соответствия для 2° наблюдателя используются, за редким исключением, только в моделировании цветового восприятия, и часто эти функции именуют *двухградусными функциями цветового соответствия* или кратко *двухградусным наблюдателем*. Любопытная историческая справка: стандартный колориметрический наблюдатель CIE 1931 основан на данных, полученных от менее чем 20-ти испытуемых![1]

В пятидесятых годах прошлого века эксперименты были повторены с тем, чтобы собрать большее количество данных по 2° функциям цветового соответствия от большего числа наблюдателей и с использованием более точного и надежного инструментария (Стайлс и Берг, 1959). Результаты показали легкую систематическую ошибку, которая не потребовала пересмотра стандартного колориметрического наблюдателя.

В то же самое время Стайлс и Берг (1959)[2] провели эксперименты и собрали данные для функций цветового соответствия при большем поле зрения. Необходимость такой работы была продиктована несоответствием между колориметрическим и визуальным определением белизны бумаги. Эксперименты были выполнены с использованием 10°-го поля зрения, выходящего за пределы центральной ямки сетчатки, благодаря чему из функций цветового соответствия было исключено влияние поглощения в желтом пятне. Оказалось, что данные по большим полям существенно отличаются от двухградусных, в результате чего был принят т.н. *дополнительный стандартный колориметрический наблюдатель CIE 1964*, иногда называемый *десятиградусным наблюдателем*.

Разница между двумя стандартными наблюдателями весьма важна, и поэтому всегда необходимо указывать, какой наблюдатель использован для получения тех или иных колориметрических данных: отличия влияют на вычисления, но, конечно, лишь в пределах вариабельности функций цветового соответ-

---

[1] 17-ти испытуемых: 7 человек обследовал Гилд, 10 — Райт. — *Прим. пер.*

[2] А также Сперанская (ГОИ, СССР). — *Прим. пер.*

ствия, полученных либо для 2°, либо для 10° полей зрения. Таким образом, о двух стандартных колориметрических наблюдателях можно говорить как о функциях цветового соответствия для двух индивидуумов.

3.7 ДИАГРАММЫ ЦВЕТНОСТЕЙ

Цвет стимула описывается тройкой трехстимульных значений, но все же были разработаны специальные диаграммы цветностей для получения удобного двухмерного представления цветов. Преобразование трехстимульных значений в координаты цветности выполняется через нормировку, удаляющую информацию о яркости; данное преобразование — это т.н. перспективная одноточечная проекция точечных данных трехмерного трехстимульного пространства на единичную плоскость этого пространства (с центром проекции в точке начала координат), как показано в уравнениях 3.15–3.17:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \tag{3.15}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \tag{3.16}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \tag{3.17}$$

По выполнении проекции мы имеем только двухмерную информацию, которую несут координаты цветности. Третью координату цветности всегда можно получить из двух других, так как сумма всех трех всегда равна единице. Таким образом, z-координата может быть вычислена из x и y по уравнению 3.18:

$$z = 1.0 - x - y \tag{3.18}$$

Пользоваться координатами цветности нужно с большой осторожностью, поскольку они пытаются представить трехмерный феномен только двумя параметрами. Для полного описания цветового стимула к координатам цветности нужно добавить еще одно трехстимульное значение. Обычно добавляют величину Y, поскольку она несет информацию о яркости. Формулы получения двух оставшихся трехстимульных значений из координат цветности и трехстимульного Y-значения часто бывают полезными и поэтому даны в виде уравнений 3.19 и 3.20:

$$X = \frac{xY}{y} \tag{3.19}$$

$$Z = \frac{(1.0 - x - y)Y}{y} \tag{3.20}$$

Сами по себе координаты цветности не содержат сведений о цветовом восприятии стимулов, поскольку не несут в себе информации о яркости стимула

(следовательно, о его светлоте) и не учитывают эффекта хроматической адаптации. При изменении статуса адаптации наблюдателя цвет, которому соответствует данный набор координат цветности, может радикально измениться по восприятию (к примеру, от желтого до синего при переходе от адаптации по дневному свету к адаптации по свету ламп накаливания).

Масса усилий затрачена на попытки создания диаграммы цветностей, которая была бы равномерной по восприятию, но несмотря на то, что такие усилия априори тщетны (то есть априори тщетна попытка конверсии номинальной шкалы в интервальную), все же стоит упомянуть об одном из плодов этих усилий: о диаграмме цветностей, рекомендованной CIE для общего пользования, то есть о *диаграмме равномерных шкал цветности CIE 1976* (Uniform Chromaticity Scales — UCS), определяемой уравнениями 3.21 и 3.22:

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \tag{3.21}$$

$$\upsilon' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \tag{3.22}$$

В большинстве случаев нужно стараться уходить от использования диаграмм цветности, особенно тогда, когда исследуемые явления сильно зависят от трехмерной природы цвета, к примеру: показ и сравнение охватов цветовоспроизводящих устройств на диаграммах цветности вводят в сильное заблуждение, граничащее с полной дезинформацией.

3.8 ЦВЕТОВЫЕ ПРОСТРАНСТВА CIE

С появлением цветовых пространств CIELAB и CIELUV необходимость использования диаграмм цветности фактически отпала, поскольку эти пространства расширяют трехстимульную колориметрию до трехмерных пространств, в которых оси приблизительно коррелируют с восприятием светлоты, насыщенности и цветового тона стимула. Достичь такого результата удалось за счет учета хроматической адаптации и нелинейности зрительных ответов, но главная цель создания упомянутых пространств — это разработка методов равномерного измерения цветовых отличий, что не может быть выполнено корректно с помощью трехстимульных пространств или диаграмм цветности.

В 1976 г. к использованию были рекомендованы оба упомянутых пространства, поскольку в то время не было ясно, как выражать одно через другое. Цветовые пространства CIELAB и CIELUV детально описаны в главе 10, здесь же приведен лишь сокращенный набор их уравнений.

Вышецкий (1986) дает обзор развития цветовых пространств CIE.

CIELAB

Цветовое пространство CIE 1976 ($L^*a^*b^*$) (сокращенно CIELAB) определяется уравнениями 3.23–3.27 для трехстимульных значений (больших, чем 0.008856), нормированных на эталонный белый.

$$L^* = 116(Y / Y_n)^{1/3} - 16 \quad (3.23)$$

$$a^* = 500[(X / X_n)^{1/3} - (Y / Y_n)^{1/3}] \quad (3.24)$$

$$b^* = 200[(Y / Y_n)^{1/3} - (Z / Z_n)^{1/3}] \quad (3.25)$$

$$C^*_{ab} = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (3.26)$$

$$h_{ab} = \tan^{-1}(b^* / a^*) \quad (3.27)$$

В приведенных формулах X, Y и Z — это трехстимульные значения исследуемого стимула, X_n, Y_n и Z_n — трехстимульные значения эталонного белого. L^* представляет светлоту, a^* приблизительно «красноту-зелень», b^* — приблизительно «желтизну-синеву», C^*_{ab}— насыщенность, h_{ab} — цветовой тон. Координаты L^*, a^* и b^* использованы для создания декартова цветового пространства, показанного на рис. 3.9. Координаты L^* , C^*_{ab} и h_{ab} — это цилиндрическое представление того же пространства.

Пространство CIELAB, включающее в себя полный комплект формул для темных цветов, детально описано в главе 10.

CIELUV

Цветовое пространство CIE 1976 ($L^*u^*\upsilon^*$) (сокращенно CIELUV) определяется уравнениями 3.28–3.32. Уравнение 3.28 также ограничивает трехстимульные значения (большие, чем 0.008856) нормировкой на эталонный белый.

$$L^* = 116(Y / Y_n)^{1/3} - 16 \quad (3.28)$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n) \quad (3.29)$$

$$\upsilon^* = 13L^*(\upsilon' - \upsilon'_n) \quad (3.30)$$

$$C^*_{u\upsilon} = \sqrt{(u^{*2} + \upsilon^{*2})} \quad (3.31)$$

$$h_{u\upsilon} = \tan^{-1}(\upsilon^* / u^*) \quad (3.32)$$

В данных формулах u'и υ' — координаты цветности стимула, а u'_n и υ'_n — координаты цветности эталонного белого. L^* представляет светлоту, u^* приблизительно «красноту-зелень», υ^* — приблизительно «желтизну-синеву», $C^*_{u\upsilon}$ — насыщенность, $h_{u\upsilon}$ — цветовой тон. Как и в CIELAB, координаты L^*, u^* и υ^* используются для создания декартова цветового пространства, а L^*, $C^*_{u\upsilon}$ и $h_{u\upsilon}$ являются его цилиндрическим представлением.

Оба пространства — CIELAB и CIELUV — рекомендованы в 1976 г. как вре-

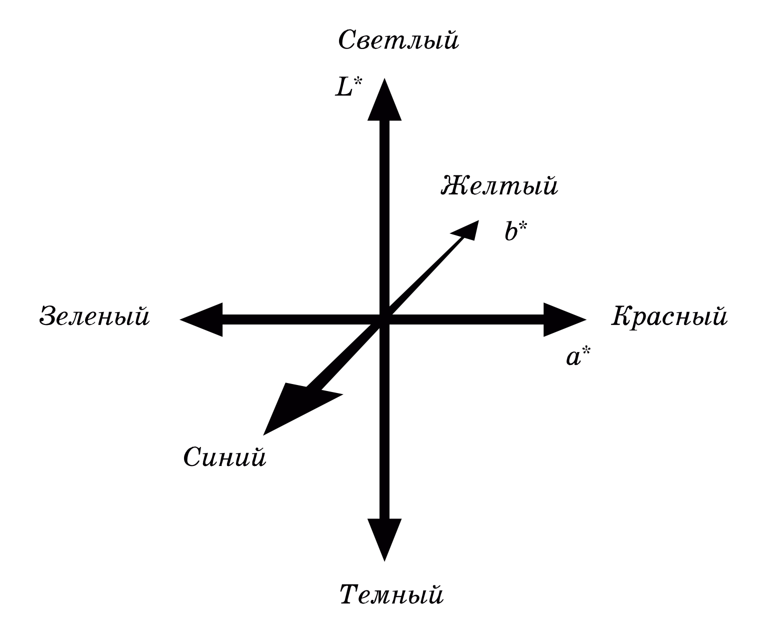


Рис. 3.9 Трехмерное представление CIELAB L^*-, a^*- и b^*-координат.

менное решение проблем спецификации цветовых отличий в отражающих образцах. Однако с тех пор пространство CIELAB стало почти повсеместно использоваться для цветовой спецификации, в частности для измерения цветовых отличий, и считается, что нет никаких причин к использованию CIELUV вместо CIELAB.

3.9 СПЕЦИФИКАЦИЯ ЦВЕТОВЫХ ОТЛИЧИЙ

В пространстве CIELAB цветовые отличия измеряются как эвклидово расстояние между координатами двух стимулов, обозначенное как CIELABΔE^*_{ab} и вычисляемое по формуле 3.33, но также ΔE^*_{ab} можно выразить через отличия в светлоте, насыщенности и цветовом тоне, как показано в уравнении 3.34, с использованием комбинаций формул 3.33 и 3.35.

$$\Delta E^*_{ab} = [\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}]^{1/2} \quad (3.33)$$

$$\Delta E^*_{ab} = [\Delta L^{*2} + \Delta C^{*2}_{ab} + \Delta H^{*2}_{ab}]^{1/2} \quad (3.34)$$

$$\Delta H^*_{ab} = [\Delta E^{*2}_{ab} - \Delta L^{*2} - \Delta C^{*2}_{ab}]^{1/2} \quad (3.35)$$

Несмотря на то, что цветовое пространство CIELAB создавалось с целью получения цветовых отличий, равномерных по восприятию на протяжении всего пространства (к примеру, величина $\Delta E^*_{ab} = 1.0$ для пары красных стимулов по восприятию равна величине $\Delta E^*_{ab} = 1.0$ для пары серых стимулов), к этой цели не удалось даже приблизиться. Для повышения равномерности измерений цвето-

вых отличий был выполнен ряд модификаций формулы CIELAB ΔE^*_{ab}, основанных на различных эмпирических данных. Одна из наиболее серьезных модификаций — это т.н. CMC-формула цветовых отличий (Кларк и др., 1984), которая основана на экспериментах по исследованию восприятия цветовых отличий, выполненных по заказу текстильной промышленности.

Относительно недавно CIE (1995) на основе новых экспериментальных визуальных данных разработала и рекомендовала промышленности новые уравнения для вычисления цветовых отличий. Новая система уравнений называется «Модель цветовых отличий CIE 1994 ($\Delta L^* \Delta C^*_{ab} \Delta H^*_{ab}$)» и обозначается символом ΔE^*_{94} или аббревиатурой CIE94. Уравнение CIE94 получено из уравнения CIELAB ΔE^*_{ab}, цветовые отличия CIE94 вычисляются по формулам 3.36–3.39:

$$\Delta E^*_{94} = \left[\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*_{ab}}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*_{ab}}{k_H S_H} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.36)$$

$$S_L = 1 \quad (3.37)$$

$$S_C = 1 + 0.045 C^*_{ab} \quad (3.38)$$

$$S_H = 1 + 0.015 C^*_{ab} \quad (3.39)$$

Параметрические коэффициенты k_L, k_C и k_H использованы для управления относительными поправками по светлоте, насыщенности и цветовому тону соответственно, при вычислении цветовых отличий для различных условий просмотра, отклоняющихся от эталонных условий CIE94. Стоит отметить, что в среднем по всему цветовому пространству цветовые отличия CIE94 для одной и той же пары стимулов ощутимо меньше по величине, чем цветовые отличия CIELAB; поэтому CIE94 (если ее значения по какой-либо причине ошибочно принять за цветовые отличия CIELAB) продемонстрирует в целом лучшие результаты в большинстве колориметрических сфер своего применения (например, таких, как оценка результатов колориметрической характеризации цветовоспроизводящих устройств). То же касается и CMC-цветовых отличий.

В 1995 г. CIE утвердила следующий набор эталонных условий для использования формул CIE94:

— *освещение*: имитатор CIE D65-осветителя;
— *освещенность*: 1000 lux;
— *наблюдатель*: наблюдатель с нормальным цветовым зрением;
— *фон*: равномерный, ахроматичный, L^*=50;
— *режим просмотра*: предметный;
— *размер образца*: больший, чем 4° визуального угла;
— *пространственное взаиморасположение образцов*: прямой краевой контакт;
— *величина цветового отличия между образцами*: 0–5 единиц CIELAB;
— *структура образца*: визуально плоский и однородный.

Также следует отметить, что для образцов, угловой размер которых превышает 4°, рекомендуется использовать дополнительного стандартного колориметрического наблюдателя CIE[1].

Краткое описание эталонных условий для формул CIE94 подчеркивает, что для того чтобы отработать универсальную систему измерения цветовых отличий, необходимо выполнить большое число исследований. Описанные проблемы — это лишь часть проблем, которые нужно решать в деле развития моделей цветового восприятия.

Позднее CIE приняла формулу цветовых отличий CIE DE2000 (см. Джонсон и Фершильд 2003, CIE 2001), которая развивает и усложняет концепцию CIE94. И хотя формула DE2000 в отношении ряда данных точнее, чем CIE94, из-за своей повышенной сложности она, вероятнее всего, не получит широкого прикладного распространения.[2]

3.10 СЛЕДУЮЩИЙ ШАГ

Выше были рассмотрены основные принципы базовой колориметрии (см. рис. 3.1) и начат разговор о колориметрии высшей, однако, несмотря на то, что описанные методы давно устоялись и успешно применяются на протяжении десятилетий, для расширения базовой колориметрии до уровня эффективной спецификации цветового восприятия стимулов в широком диапазоне условий просмотра, треугольник цвета на рис. 3.1 придется дополнить немалым числом данных, то есть, как минимум, данными, описывающими:

— статус хроматической адаптации;
— статус световой адаптации;
— уровень фотометрической яркости;
— цвет фона;
— цвет окружения;
— и т.п.

В следующих главах мы будем обсуждать все эти вопросы, поскольку они лежат на пути к развитым и работоспособным моделям цветового восприятия.

ПРИМЕЧАНИЕ ПЕРЕВОДЧИКА К ГЛАВЕ 3

Особое внимание читателя необходимо обратить на тот факт, что кривые сложения CIE *RGB* (и, соответственно, их математическое производное — кривые сложения CIE *XYZ*) получены с помощью трехстимульного визуального колориметра вне какой-либо световой адаптации зрения. Следовательно, трехстимульные значения *XYZ* — это цветовые координаты стимула при *темновой адаптации* наблюдателя (Федоров, 1934). Данный факт принципиально важен для облегчения понимания дальнейшего материала книги.

Стоит отметить также, что состояние темновой адаптации часто именуют «состоянием вне адаптации», что спорно.

---

[1] Здесь возможна опечатка: вероятно, автор имел в виду образцы с угловым размером более 10°, т.е. площадью более 25 $см^2$. — *Прим. пер.*

[2] К счастью, данный прогноз не оправдывается: компания GretagMacbeth внедрила DE2000 в свой колориметрический софт, и также можно ожидать, что в скором времени им будет прошито ППЗУ мобильных спектрофотометров SpectroEYE. — *Прим. пер.*

4 ТЕРМИНОЛОГИЯ МОДЕЛЕЙ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

В любой научной дисциплине большая часть знаний заключена в определениях и терминах, которыми пользуются практикующие ученые. Новички понимают, что мало освоить азы той или иной научной концепции: нужно еще выучить профессиональный язык, владение которым необходимо для точного и эффективного научного общения. При изучении науки о цветовом восприятии сказанное особенно важно, и недаром Хант (1978) выразил сожаление по поводу того, что ученые-цветоведы и технологи производств ведут себя подобно Шалтаю-болтаю из «Алисы в зазеркалье», который говаривал: «Когда я произношу слово, оно означает лишь то, что я хочу, — ни больше, ни меньше». Однако все мы знаем, что в итоге случилось с Шалтаем-болтаем.

Понятия и определения, обсуждаемые в данной главе, — это отправная точка дальнейшей работы, а также гарантия того, что обсуждаемые далее концепции, экспериментальные данные и модели будут восприняты последовательно и верно. Как видно из предыдущего текста, нашу профессиональную терминологию нельзя назвать исторически сложившейся — она все время меняется и развивается.

4.1 ВАЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Отчего так трудно выработать единую и последовательную терминологию в науке о цветовом восприятии? Возможно оттого, что ответ лежит в самоей природе обсуждаемого предмета: почти каждый из нас *знает*, каков цвет, почти каждый имеет опыт цветовосприятия, накапливаемый от момента рождения, однако же очень немногие могут точно описать свой цветовой опыт и точно охарактеризовать цвет. Врожденное знание в совокупности с привычкой невнятно выражаться (к примеру: «теплее», «холоднее», «ярче», «чище», «свежее») приводит к тому, что при, казалось бы, полной очевидности обсуждаемого предмета точно охарактеризовать его может далеко не каждый, но если цветовое восприятие описать систематическим, математическим путем, то все составные элементы данного феномена будут иметь четкое и согласованное определение.

Поскольку моделирование цветового восприятия остается сферой активного научного исследования, мы не найдем в истории нашей науки твердых, устоявшихся формулировок. Определения, приведенные в текущей главе, взяты из трех источников: первый и самый авторитетный — «Международный осветительный словарь»[1], опубликованный Международной Комиссией по освеще-

[1] Опубликован на четырех языках: английском, французском, немецком и русском. — *Прим. пер.*

нию — CIE (CIE 1987). «Международный осветительный словарь» включает в себя определения примерно 950-ти понятий и величин, касающихся света и цвета, и создан он «во имя продвижения международных стандартов по величинам, единицам, символам и терминам». Оставшиеся два источника — это статьи Ханта (1977, 1978), в которых он дает описание работы по подготовке к выходу в свет последней редакции упомянутого словаря.

Отметим, что «Международный осветительный словарь» ныне вновь пересматривается, но существует непротиворечащий ему т.н. ASTM-стандарт на феноменологическую терминологию (ASTM, 1995).

Следует иметь в виду, что приведенные ниже определения — это сугубо перцепционные понятия: они характеризуют наше восприятие цветовых стимулов, но не являются определениями специфических колориметрических величин. Напомним, что целью создания и использования моделей цветового восприятия является развитие и использование физически измеряемых величин, коррелирующих с атрибутами цветового восприятия, описанными ниже.

4.2 ЦВЕТ

К определению цвета предъявляются довольно интересные и сложные требования, и, несмотря на то, что каждый из нас знает, каков цвет, очень сложно дать его отвлеченное определение без использования каких-либо примеров. Как мы увидим ниже, даже самые лучшие и самые знающие ученые-цветоведы, в частности те, что написали «Международный осветительный словарь», не смогли дать такое определение.

⇨ **Цвет (Color)** — это атрибут зрительного ощущения, содержащий некую комбинацию хроматических и ахроматических компонентов. Этот атрибут может быть описан как по хроматическому компоненту (например: желтый, оранжевый, коричневый, красный, розовый, зеленый, синий, фиолетовый и т.д.), так и по ахроматическому (белый, серый, черный и т.д.), а также квалифицирован как яркий, тусклый, светлый, темный и т.п. или описан комбинацией перечисленных наименований.

Авторы определения четко понимали, что цветовое восприятие — далеко не простая вещь, и сделали примечание, которое фактически отвечает на вопрос: зачем нужны модели цветового восприятия?

⇨ *Примечание:* цветовое восприятие определяется спектральным распределением энергии цветового стимула и зависит от размера, формы, структуры и окружения области этого стимула, а также от статуса адаптации зрительной системы наблюдателя и его личного опыта пребывания в подобных ситуациях наблюдения (как в превалирующих ситуациях в его жизненном опыте).

Данное примечание прямым текстом говорит нам о большом числе физиче-

ских, физиологических, психологических и когнитивных переменных, воздействующих на цветовое восприятие, многие из которых обсуждаются в данной книге.

В то время как вышеупомянутое определение цвета неудовлетворительно из-за своей неконкретности, прочие (вполне конкретные) определения представляются еще менее удовлетворительными, к примеру, одно из определений звучит так: цвет — это атрибут зрительного стимула, не зависящий от пространственных и временных переменных. Такое определение вообще никуда не годится, поскольку при отсутствии временны́х и пространственных вариаций стимула его цветовое восприятие просто исчезнет.

Несмотря на трудности в формулировке определения цвета как такового, различные атрибуты цвета могут быть описаны достаточно точно, и их определения играют важнейшую роль в моделировании цветового восприятия.

4.3 ЦВЕТОВОЙ ТОН

⇨ **Цветовой тон (Hue)** — это атрибут зрительного ощущения, благодаря которому область просмотра воспринимается подобной одному из однозначных цветов: красному, желтому, зеленому и синему или комбинации двух из них.

⇨ **Ахроматический цвет** (Achromatic Color) — цвет, лишенный цветового тона.

⇨ **Хроматический цвет** (Chromatic Color) — цвет, имеющий цветовой тон.

Еще раз повторим: затруднительно, но все же возможно определить цветовой тон без использования конкретных примеров, причем отчасти это определение зависит от природы восприятия цветового тона, что иллюстрирует нам естественная интервальная шкала, традиционно именуемая «цветовым кругом».

Отметим, что не существует нулевого цветового тона. Цвет, лишенный цветового тона, можно описать, но не существует вида восприятия, соответствующего цветовому тону с нулевым значением, поэтому модели цветового восприятия, разговор о которых пойдет в следующих главах, никогда не описывают цветовой тон по шкалам, ранг которых превышает интервальный.

«Круговая» природа цветового тона продемонстрирована на рис. 5.2, иллюстрирующем размерность цветового тона в *манселловском атласе цветов*. Цветовой круг на рис. 5.2 иллюстрирует также и то, каким образом все цветовые тона могут быть описаны в понятиях «красный», «желтый», «зеленый», «синий» (или их комбинациях), как то предписывает оппонентная теория цветового зрения, а прочие тона включают в себя цветовые переходы, наблюдаемые в видимом спектре или радуге.

Три из четырех кубиков, показанных на рис. 4.1, имеют три разных цвето-

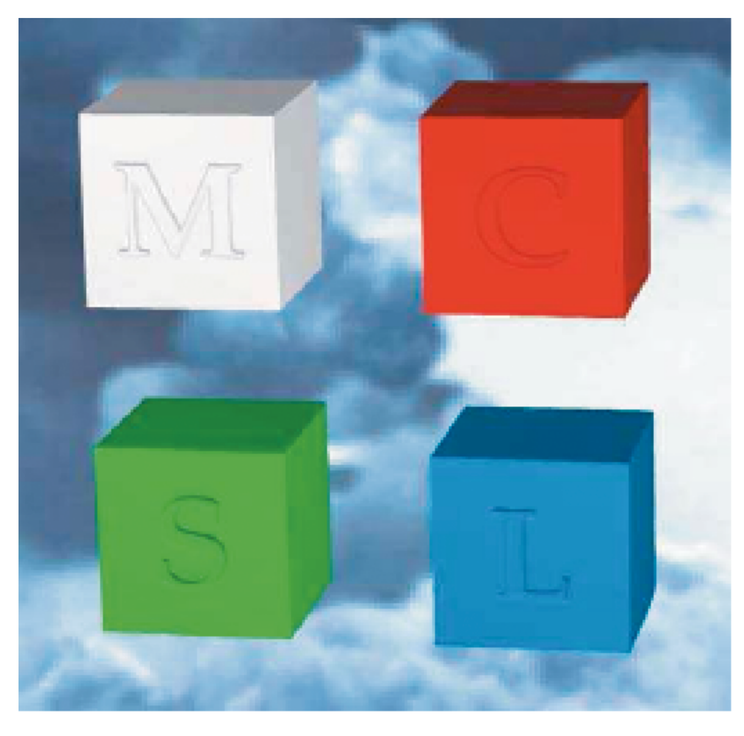


Рис. 4.1 Компьютерная презентация четырех кубиков, освещенных двумя источниками света с различной интенсивностью и разными углами освещения. Используется для демонстрации различных атрибутов цветового восприятия.

вых тона: красный, зеленый и синий; четвертый — белый и, следовательно, ахроматичный, не обладающий цветовым тоном.

4.4 СУБЪЕКТИВНАЯ ЯРКОСТЬ И СВЕТЛОТА

⇨ **Субъективная яркость** (Brightness) — это атрибут зрительного ощущения, согласно которому область просмотра воспринимается как испускающая большее или меньшее количество света.

⇨ **Светлота** (Lightness) — это субъективная яркость области просмотра, оцениваемая относительно субъективной яркости аналогично освещенной поверхности, воспринимаемой как белая или высокопрозрачная.
Примечание: только неизолированные цвета (см. параграф 4.7) имеют светлоту.

Определения субъективной яркости и светлоты вполне конкретны и интуитивны, но важно отметить, что субъективная яркость относится к абсолютному уровню восприятия, тогда как о светлоте мы говорим как об относительной субъективной яркости, то есть о субъективной яркости, нормированной на отличия в освещении или условиях просмотра. Классический пример: лист бумаги, например страница данной книги. Если этот лист освещен типичным офисным светом, то он будет обладать определенной субъективной яркостью и до-

вольно высокой светлотой (вероятнее всего — это будет самый светлый стимул в поле зрения и, следовательно, белый): если смотреть на книжку при солнечном освещении, то от страницы будет отражаться значительно большее количество энергии и бумага будет восприниматься более яркой, однако, вероятнее всего, бумага по-прежнему будет предъявлять нам самый светлый стимул поля зрения и сохранит свою высокую светлоту, причем приблизительно такую же, как и при офисном освещении. Иными словами, бумага по-прежнему воспринимается белой, даже несмотря на то, что солнечное освещение куда ярче, чем офисное. Фактически это был пример того, что светлота в целом константна.

На рис. 4.1 показаны четыре кубика, освещенные двумя источниками с различной интенсивностью, но одинаковой цветностью. Представьте себе, что вы действительно рассматриваете эти кубики при таком освещении: в этом случае станет ясно, что разные стороны кубиков по-разному освещены и демонстрируют различные яркости. Однако, если попросить вас оценить светлоту красного, зеленого и синего кубиков, вы дадите однозначный ответ, что все три кубика на сходных гранях имеют одинаковую светлоту, поскольку вы будете интерпретировать светлоту как яркость относительно яркости аналогично освещенного белого объекта.

4.5 ПОЛНОТА ЦВЕТА И НАСЫЩЕННОСТЬ

⇨ **Полнота цвета** (Colorfulness)[1] — это атрибут зрительного ощущения, согласно которому область просмотра воспринимается как более или менее хроматичная.
Примечание: для цветового стимула с данной цветностью (в случае неизолированных цветов) и с данным коэффициентом яркости полнота цвета обычно увеличивается по мере повышения яркости, за исключением тех случаев, когда яркость чересчур велика.

⇨ **Насыщенность** (Chroma) — это отношение полноты цвета области просмотра к субъективной яркости аналогично освещенной области, воспринимаемой как белая или высокопрозрачная.
Примечание: для данных условий просмотра и уровней яркости в диапазоне фотопического зрения неизолированный цветовой стимул, испускаемый поверхностью с данным коэффициентом яркости, на всех уровнях этой яркости воспринимается как цвет с данной цветностью и постоянной насыщенностью (за исключением очень высоких яркостей). Если при прочих равных, при данном уровне яркости, коэффициент яркости повышается, то обычно растет и насыщенность.

Как было показано в главах 1–3, цветовое восприятие в целом трехмерно.

---

1 Из соображений удобочитаемости в ряде контекстов полный термин «полнота цвета» сокращен до «полнота». — *Прим. пер.*

Два измерения (цветовой тон и субъективная яркость/светлота) уже были определены, и теперь на очереди полнота цвета и насыщенность.

Полнота цвета относится к насыщенности, как субъективная яркость к светлоте. Соответственно можно говорить, что насыщенность — это относительная полнота цвета, равно как светлота — это относительная субъективная яркость. Полнота цвета описывает интенсивность цветового тона данного цветового стимула. Таким образом, ахроматические цвета демонстрируют нулевые полноту цвета и насыщенность, по мере же увеличения цветового компонента (при постоянных яркости/светлоте и цветовом тоне) полнота цвета и насыщенность растут.

Подобно светлоте насыщенность в целом константна на любых уровнях яркости стимула, однако отметим, что насыщенность может измениться, если меняется цвет освещения. С другой стороны, полнота цвета данного объекта растет по мере повышения яркости стимула, поскольку полнота цвета — это абсолютная перцепционная величина.

Рис. 4.1 демонстрирует отличие полноты цвета от насыщенности: вновь представьте себя в тех же условиях освещения, что и кубики рисунка 4.1. Поскольку разные стороны красного, зеленого и синего кубиков освещены с разной интенсивностью, но одним и тем же светом, они будут отличаться по полноте цвета, однако же, если вы попытаетесь оценить насыщенность кубиков, вам придется признать, что она одинакова у всех трех на всех гранях: так произойдет потому, что вы будете оценивать каждую сторону относительно белого объекта, освещенного сходным образом. Более освещенные стороны кубиков демонстрируют большую полноту цвета, но насыщенность в целом постоянна у каждого кубика.

4.6 ЧИСТОТА ЦВЕТА

⇨ **Чистота цвета** (Saturation)[1] — это полнота цвета области просмотра по отношению к ее субъективной яркости.
Примечание: для данных условий просмотра и уровней яркости в диапазоне фотопического зрения цветовой стимул с данной цветностью в целом константен по чистоте цвета на всех уровнях своей яркости за исключением сверхвысокой яркости.

Чистота цвета — это уникальный перцепционный опыт, отличный от насыщенности. Аналогично насыщенности, о чистоте можно говорить как об относительной полноте цвета, однако чистота цвета — это полнота цвета стимула по отношению к его *собственной* яркости, тогда как насыщенность — это полнота цвета по отношению к субъективной яркости сходным образом освещенной области, воспринимаемой как белая. Таким образом, насыщенность стимула оценивается по отношению к другим цветам, тогда как о чистоте цвета мы говорим

---

[1] Из соображений удобочитаемости в ряде контекстов полный термин «чистота цвета» сокращен до «чистота». — *Прим. пер.*

тогда, когда стимул полностью изолирован от других стимулов. Примером стимула, демонстрирующего чистоту цвета (но не насыщенность) является изолированный от других ночной сигнальный огонь — обычно красные, желтые или зеленые, такие огни весьма чисты и по цветовому восприятию их можно сравнивать со светом фар приближающегося автомобиля, чистота цвета которых близка к нулю (поскольку они, как правило, белые).

Чистоту цвета иногда описывают на примере т.н. теневых рядов, апеллируя при этом к изменению цвета, которое наблюдают тогда, когда единичный объект попадает в тень: когда объект оказывается в глубокой тени, он начинает восприниматься более темным, но чистота его цвета остается неизменной, что можно проследить по рис. 4.1, предположив при этом, что пространство освещено единственным источником. В этом случае все стороны всех трех окрашенных кубиков будут иметь более или менее постоянную чистоту цвета.

4.7 ИЗОЛИРОВАННЫЕ И НЕИЗОЛИРОВАННЫЕ ЦВЕТА

⇨ **Изолированный цвет** (Unrelated Color) — это цвет области просмотра или объекта, воспринимаемый изолированно от иных цветов.

⇨ **Неизолированный цвет** (Related Color) — это цвет области просмотра или объекта, воспринимаемый в сравнении с иными цветами.

Разница между изолированными и неизолированными цветами критична для четкого понимания процессов цветового восприятия, но определения просты: неизолированные цвета оцениваются по отношению к цвету других цветовых стимулов, тогда как изолированные цвета — это цвета самостоятельные. Почти в каждой области, имеющей отношение к цветовому восприятию, оперируют неизолированными цветами, которые, наряду с изолированными, также находятся в центре внимания нашей книги; при этом важно отметить, что многие эксперименты, заложившие основу понимания механизмов цветового зрения и цветового восприятия, были выполнены с изолированными стимулами — изолированными цветами: об этом всегда нужно помнить и не пытаться прогнозировать явления, происходящие с неизолированными цветами, прибегая к моделям, построенным на изолированных цветах, и наоборот.

Время от времени о неизолированных цветах говорят как о восприятии цветовых стимулов неких объектов, а об изолированных — как о восприятии самосветящихся стимулов. Такие суждения ошибочны, ведь стимул от объекта может быть воспринят изолированно и, следовательно, цвет будет изолированным, в то же время, самосветящиеся стимулы (скажем, стимулы CRT-дисплея) могут наблюдаться один в сравнении с другим и, таким образом, восприниматься как неизолированные цвета.

Различные явления, обсуждаемые в данной книге, касаются либо изолированных, либо неизолированных цветов. Очень интересным примером является восприятие серого и коричневого цветовых стимулов. Серый и коричневый невозможно воспринимать безотносительно к другим цветам: серый — это ахроматический цвет, светлота которого существенно ниже белого; коричневый —

это оранжевый с низкой светлотой. Оба цветовых наименования определены тем или иным уровнем светлоты, но поскольку светлота и насыщенность требуют оценки по отношению к каким-либо иным стимулам, полученным при сходном освещении, эти цвета не могут быть изолированными.

Для того чтобы убедиться в справедливости вышесказанного, попробуйте найти свет, который виден изолированно (то есть в очень темном окружении) и воспринимается при этом как серый или коричневый — вряд ли вам это удастся. Эффектно продемонстрировать относительность этих цветов можно с помощью светового пятна, воспринимаемого как белое (или как оранжевое) и находящегося в белом окружении. Если начать повышать яркость белого окружения, то спустя некоторое время восприятие оригинального стимула изменится от белого (или оранжевого) к серому (или к коричневому); если же яркость окружения увеличить очень сильно, то оригинальный стимул будет восприниматься вообще как черный.

Интересный разговор о коричневом цвете предлагают Бартлесон (1976), Фулд и др. (1983), Маусфельд и Нидерэ (1993).

Выбор наименования, определяющего цветовое восприятие, зависит от предварительного учета различия между неизолированными и изолированными цветами. У изолированных цветов существуют лишь следующие атрибуты восприятия: цветовой тон, субъективная яркость, полнота цвета и его чистота. У изолированных цветов отсутствуют те атрибуты цветового восприятия, которые являются результатом оценки относительно белого (и сходным образом освещенного) объекта. С другой стороны, у неизолированных цветов присутствуют все атрибуты восприятия: цветовой тон, субъективная яркость, светлота, полнота цвета, насыщенность и чистота.

4.8 ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ВИДЕ ФОРМУЛ

Понятия, точно описывающие цветовое восприятие, периодически путают. Поэтому, для того чтобы сохранить точность определений, часто прибегают к простым формулам, которые не являются строго математическими и дают лишь общее описание взаимоотношений между различными атрибутами цветового восприятия. Понимание определений в логике данных формул — это краеугольный камень понимания сути различных моделей цветового восприятия.

О насыщенности можно говорить как о полноте цвета, взятой относительно субъективной яркости белого объекта, освещенного сходным образом (формула 4.1):

$$\text{Насыщенность} = \frac{\text{Полнота цвета}}{\text{Субъективная яркость (белого)}} \qquad (4.1)$$

Чистота может быть описана как полнота цвета стимула, взятая относительно его субъективной яркости (формула 4.2):

$$\text{Чистота цвета} = \frac{\text{Полнота цвета}}{\text{Субъективная яркость}} \qquad (4.2)$$

Наконец, светлота может быть представлена как отношение субъективной яркости стимула к субъективной яркости сходным образом освещенного белого объекта (формула 4.3):

$$\text{Светлота} = \frac{\text{Субъективная яркость}}{\text{Субъективная яркость (белого)}} \qquad (4.3)$$

Пользу от формулировки определений в виде формул можно продемонстрировать с помощью альтернативного определения чистоты (используемого в некоторых моделях цветового восприятия), в котором чистота цвета — это отношение насыщенности к светлоте (формула 4.4):

$$\text{Чистота цвета} = \frac{\text{Насыщенность}}{\text{Светлота}} \qquad (4.4)$$

Доказать это можно путем замены насыщенности и светлоты в данной формуле формулами их первичного определения: формулы 4.1 и 4.3. На выходе получим формулу 4.5:

$$\text{Чистота цвета} = \frac{\text{Полнота цвета}}{\text{Субъективная яркость (белого)}} \cdot \frac{\text{Субъективная яркость (белого)}}{\text{Субъективная яркость}} \qquad (4.5)$$

Выполнив алгебраическое сокращение понятия «*Субъективная яркость (белого)*», получим, что чистота цвета представляет собой отношение полноты цвета стимула к его субъективной яркости (формула 4.6), которое окажется идентичным оригинальному определению по формуле 4.2:

$$\text{Чистота цвета} = \frac{\text{Полнота цвета}}{\text{Субъективная яркость}} \qquad (4.6)$$

4.9 СУБЪЕКТИВНАЯ ЯРКОСТЬ/ПОЛНОТА ПРОТИВ СВЕТЛОТЫ/НАСЫЩЕННОСТИ

О цвете, как правило, думают как о трехмерном явлении, и цветовые соответствия, как правило, оценивают при помощи только трех чисел. Однако выясняется, что для детального описания цветового восприятия трех измерений недостаточно и что фактически для спецификации цветового восприятия необходимы пять перцепционных измерений:

- Субъективная яркость
- Светлота
- Полнота цвета
- Насыщенность
- Цветовой тон

Чистота избыточна, потому что автоматически известна, если известны все пять атрибутов, перечисленных выше. Однако на практике почти никогда не возникает необходимости знать все пять параметров: обычно наибольший интерес представляют неизолированные цвета и только относительные атрибуты восприятия по-настоящему важны. Таким образом, чаще всего стоит интересоваться относительными атрибутами восприятия, такими, как светлота, насыщенность и цветовой тон.

Может показаться, что для описания цветового восприятия использование всех пяти атрибутов излишне, однако это не всегда так, на что элегантно намекает Наятани (1990). В своей статье Наятани описывает теоретическую и экспериментальную разницу между перцепционным соответствием стимулов по субъективной яркости/полноте и перцепционным соответствием по светлоте/насыщенности и показывает, что в большинстве условий просмотра эти два способа сравнения различны.

Представьте себе, что в солнечный день вы смотрите на желтый школьный автобус — его пример продемонстрирует типичные атрибуты восприятия: цветовой тон (желтый), субъективная яркость (высокая), светлота (высокая), полнота цвета (высокая) и насыщенности (высокая). Теперь представьте себе, что вы рассматриваете фоторепродукцию нашего школьного автобуса при относительно слабом офисном или домашнем освещении: изображение автобуса будет идеально соответствовать оригинальному объекту по цветовому тону (желтый), светлоте (высокая) и насыщенности (высокая), однако субъективная яркость и полнота цвета при рассматривании отпечатка в тусклом свете никогда не будут равны таковым у реального автобуса, стоящего на ярком солнечном свету. Так получается потому, что от отпечатка отражается гораздо меньше световой энергии, чем от оригинального объекта, но если теперь с этим отпечатком выйти на залитую солнцем улицу и подойти к самому автобусу, то вполне вероятно, что репродукция будет соответствовать оригиналу по всем пяти параметрам восприятия.

Встает вопрос: что важнее? — соответствие (то есть репродуцирование) по субъективной яркости и полноте цвета или по светлоте и насыщенности? (Отметим, что цветовой тон определяется одинаково в обоих случаях.) Ответ, конечно, зависит от конкретной задачи, но чаще всего результат определяется соответствием по светлоте и насыщенности, поскольку они являются наиболее важными параметрами. Проиллюстрируем сказанное: в сфере цветового репродуцирования обычно возможно (и желательно) добиваться соответствия по параметрам светлоты/насыщенности. Представьте, что вы пытаетесь выполнить репродуцирование по критерию «субъективная яркость/полнота цвета» с помощью отражающей поверхности: чтобы воспроизвести изображение освещенного ярким солнцем школьного автобуса, пригодное для рассматривания при офисном освещении, придется выполнить отпечаток, который должен в буквальном смысле слова гореть, дабы воспроизвести субъективную яркость и полноту цвета оригинала. Решить такую задачу физически невозможно, но можно пойти иным путем: с отпечатком в руках выйти на яркий свет. Но хотим ли мы этого? Представьте себе, берем фотографию некоей персоны, сделанную

при свете свечи, и выполняем репродукцию, предназначенную для рассматривания на солнечном свету: нам будет легко репродуцировать субъективную яркость и полноту цвета оригинальной сцены, но при бытовом освещении такая фотография будет выглядеть очень темной (почти черной), и мы решим, что это просто очень плохой отпечаток. Следовательно, заказчик цветовой репродукции на самом деле ожидает соответствия изображения по критерию «светлота-насыщенность».

Попытки выполнить репродуцирование, используя модель цветового восприятия, не учитывающую изменения яркости, даны на рис. 4.2 и 4.3.

Существует ряд ситуаций, когда критерий «субъективная яркость/полнота» намного важнее, чем «светлота/насыщенность». Наятани (1990) отмечает следующие:

1. *Спецификация цветовоспроизводящих свойств источников освещения*: в данном контексте важнее знать, каковы будут не столько светлота и насыщенность, сколько субъективная яркость и полнота цвета объектов под данным световым источником.

2. *Оценка качества изображения при том или ином способе репродуцирования*: к примеру, при сравнении качества диапозитивов, проектируемых на экран с помощью эпидиаскопа в затемненном (или не очень затемненном) помещении, наблюдателей в первую очередь интересует субъективная яркость

Репродуцирование на большую светимость

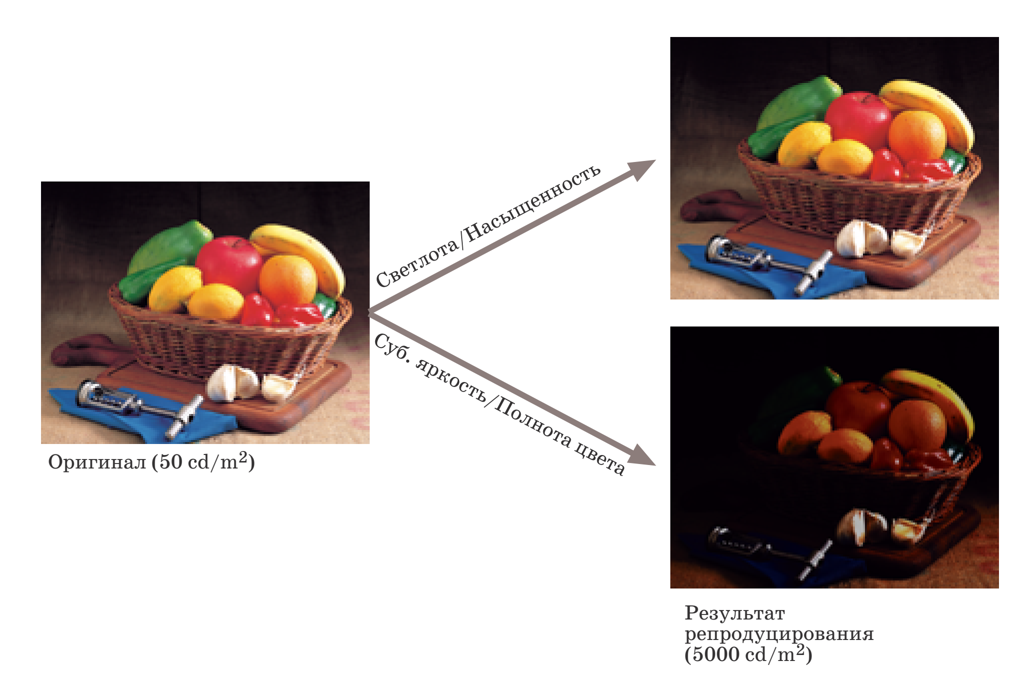


Рис. 4.2 Сравнение репродуцирования по светлоте/насыщенности с репродуцированием по субъективной яркости/полноте. Яркость оригинала меньше, чем яркость репродукции. Репродуцирование по субъективной яркости/полноте приводит к тому, что изображение (для компенсации повышенного уровня освещенности репродукции) становится очень темным. Репродуцирование по светлоте/насыщенности вполне адекватно оригиналу, поскольку оперирует относительными атрибутами восприятия.

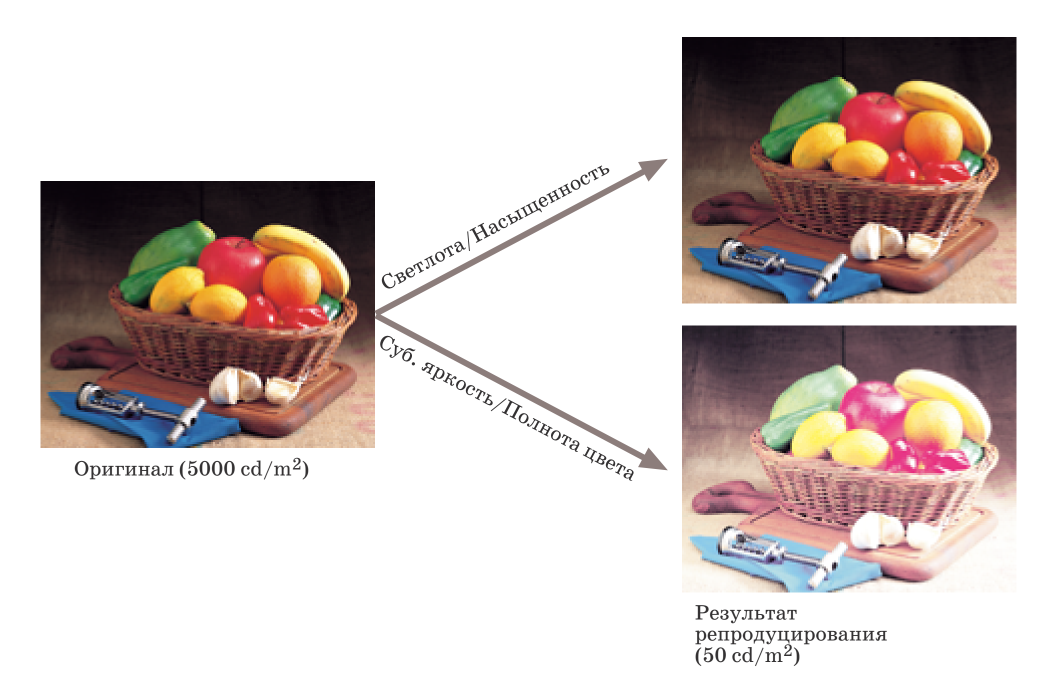


Рис. 4.3 Сравнение репродуцирования по светлоте/насыщенности с репродуцированием по субъективной яркости/полноте. Яркость оригинала больше, чем яркость репродукции. Репродуцирование по субъективной яркости/полноте приводит к тому, что изображение (для компенсации пониженного уровня освещенности репродукции) становится очень светлым. Репродуцирование по светлоте/насыщенности вполне адекватно оригиналу, поскольку оперирует относительными атрибутами восприятия.

и полнота цвета объектов изображения, нежели их светлота и насыщенность, и если вдруг снизится яркость лампы эпидиаскопа, светлота и насыщенность элементов изображения останутся в целом неизменными, но качество воспринимаемого изображения соответственно понизится.

5 ЦВЕТОВЫЕ КООРДИНАТНЫЕ СИСТЕМЫ

Коль скоро цвет зиждется на восприятии, то методом непосредственного измерения цвета является метод психофизический, построенный на использовании равномерных перцепционных шкал, о которых шел разговор в четвертой главе. Благодаря психофизическим экспериментам появилась возможность описывать стимулы на основе данных базовой колориметрии, преобразуя последние в атрибуты цветового восприятия.

Совокупность измеренных и описанных стимулов формирует цветовую координатную систему, которая позволяет давать однозначную спецификацию цветовому восприятию, но при этом не стоит ожидать, что описание цветов, данное в рамках той или иной координатной системы, будет распространяться на все возможные условия просмотра или что оно будет иметь прямую математическую связь с физическими измерениями. Таким образом, цветовые координатные системы обеспечивают нас методиками и данными, необходимыми для спецификации цветового восприятия, но при этом не предлагают математической структуры, позволяющей интерпретировать эти данные в нестандартных условиях просмотра, — поэтому, несмотря на очень важную роль цветовых координатных систем в создании и испытании моделей цветового восприятия, цветовые координатные системы не могут заменить собой сами эти модели.

В данной главе мы даем обзор тех координатных систем, что особенно важны в деле моделирования цветового восприятия и аппаратно-независимого цветовоспроизведения. Значимость цветовых координатных систем и их роль будут подробно обсуждаться как в текущей, так и в последующих главах.

Дополнительные сведения о цветовых координатных системах можно найти в статье Бернса по колориметрии (Бернс, 2000), статье Ханта о цветовых измерениях (Хант, 1991, 1998), фундаментальной книге Вышецкого и Стайлса «Наука о цвете» (Вышецкий, Стайлс, 1982), обзорной статье Вышецкого о цветовом восприятии (Вышецкий, 1986), обзоре систем цветового восприятия, выполненном Дерефельд (Дерефельд, 1991), и историческом обзоре цветовых пространств, сделанном Кюхни (Кюхни, 2003).

5.1 КРАТКИЙ ОБЗОР И ТРЕБОВАНИЯ

Существует множество определений цветовых координатных систем, и, вероятно, имеет смысл принять некую комбинацию этих определений. Вышецкий (1986) отмечает, что цветовые координатные системы делятся на три больших группы:

— системы, основанные на принципах аддитивного смешения цветовых стимулов (классический пример — система Оствальда);

— системы, основанные на принципах смешения колорантов (колориметр Ловибонда — пример цветовой координатной системы, основанной на субтрактивной смеси колорантов);

— системы, основанные на принципах цветового восприятия.

Дерефельд (1991) отмечает, что системы, описывающие цветовое восприятие, — это единственный тип систем, пригодный к широкому употреблению, и настаивает на том, что системы цветового восприятия зиждутся на координатах (или шкалах) цветовых ощущений и что шкалы эти согласованы с равными (или равномерно изменяющимися) визуальными интервалами.

В центре внимания данной главы лежат две координатных системы: т.н. Система естественных цветов (Natural Color System — NCS) и система Манселла. Хант (1991) добавляет весьма важное и полезное ограничение к определению цветовых координатных систем, говоря о том, что эти системы должны давать возможность однозначной интерполяции между координатами образцов. Наконец, еще одно, сугубо практическое требование к координатным системам: они должны обеспечивать стабильность малых цветовых отличий между образцами.

В целом, к координатным системам предъявляют следующие требования:

1. Упорядоченность и равномерность в расположении цветов.
2. Логичная система обозначений.
3. Перцепционно-значимая размерность.
4. Стабильность, верность и точность цветовых показателей образцов.

Общее назначение цветовых координатных систем состоит в том, что их перцепционные шкалы должны быть адекватны величинам восприятия, то есть отличия на шкалах должны быть равны отличиям по восприятию.

Из вышеприведенного определения выпадает ряд координатных систем, используемых в промышленной практике, к примеру: Pantone Color Formula Guide (широко используемая система цветовой спецификации красок) в целом не является цветовой координатной системой, потому что не включает в себя непрерывных шкал (или какого-либо их эквивалента). Pantone Color Formula Guide скорее можно отнести к цветовой именной системе, поскольку образцы представляют собой цвета выкрасок, подпадающие под ту или иную категории.

В изучении цветового восприятия координатные системы используются по-разному: они обеспечивают независимость данных (которые в дальнейшем могут быть использованы для построения математических моделей) по различным атрибутам восприятия (к примеру, таким, как светлота, цветовой тон и насыщенность); воспроизводят проверенные цветовые стимулы, которые можно смело использовать в психофизических экспериментах по изучению цветового восприятия; представляют собой удобный инструментарий для изучения и объяснения различных феноменов и атрибутов цветового восприятия.

Подробнее об использовании цветовых координатных систем мы поговорим в параграфе 5.6.

5.2 МАНСЕЛЛОВСКИЙ АТЛАС ЦВЕТОВ

Одной из наиболее распространенных координатных систем, в частности, в Соединенных Штатах, является система Манселла, физически реализованная в виде *манселловского атласа цветов* (Munsell Book of Color). История возникновения и развития манселловской системы описана Никерсоном (1940, 1976), но также весьма любопытным является обзор экспериментов, приведших к пересмотру манселловской системы в сороковых годах прошлого века (Ньюхолл, 1940).

Система была разработана в начале XX-го столетия художником Альбертом Х. Манселлом, для которого специфический интерес представляло создание инструмента, помогающего художественному образованию детей. Идеологической основой системы является деление цветового восприятия на три параметра:

— Цветовой тон (H),

— Светлоту (V),

— Насыщенность (C).

Суть манселловских размерностей идентична сути сегодняшних атрибутов цветового восприятия, где светлота по Манселлу соответствует обычной светлоте. Целью Манселла являлось описание цветов с психофизических и физических позиций при условии равенства приращений по трем измерениям восприятия.

Манселловская светлота

Манселловская шкала светлоты — это стержень системы, имеющий десять основных делений, где нуль соответствует черному, а промежуточные серые деления расположены в диапазоне между нулем и 10. Манселловская шкала светлоты построена так, что средне-серый имеет значение 5 (нейтрально-серый образец со светлотой 5 обозначается как №5) — это значит, что по ощущению он лежит посредине между идеально белым (№10) и идеально черным (№0). Разница по светлоте между образцами №3 и №4 точно такая же, как разница между образцами №6 и №7 или любыми другими образцами, отличающимися друг от друга на один шаг. Восприятие светлоты в пределах одного шага (то есть между двумя соседними значениями) обозначается десятичными цифрами, например, манселловская светлота 4.5 по ощущению лежит посередине между значением 4 и 5.

Важно отметить, что взаимоотношения между манселловской V и относительной фотометрической яркостью Y нелинейны и математически описываются полиномом пятого порядка[1] (уравнение 5.1), а график зависимости V от Y представляет собой кривую, показанную на рис. 5.1.

$$Y = 1.2219V - 0.23111V^2 + 0.23951V^3 - 0.021009V^4 + 0.0008404V^5 \qquad (5.1)$$

[1] Полином Джадда. Величина Y стоит в левой части уравнения, поскольку данный полином неразрешим в радикалах (согласно теореме Абеля). Полином Джадда интересен сугубо академически, тогда как практическую ценность представляет корнекубический закон Стивенса, о котором шла речь в главе 3. — *Прим. пер.*

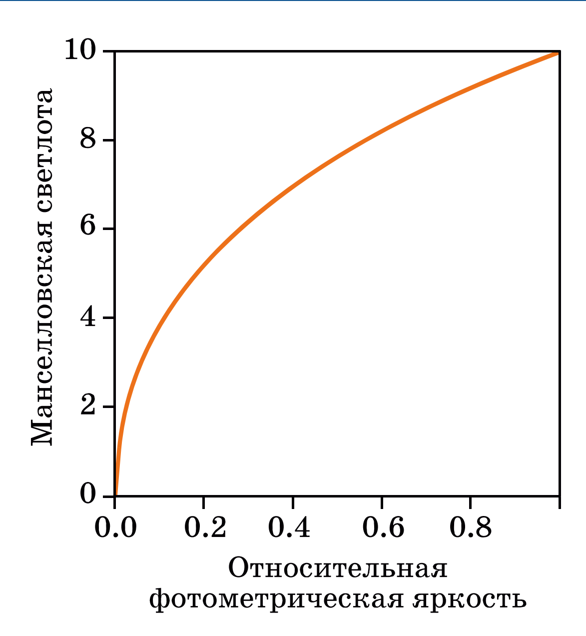


Рис. 5.1 Манселловская светлота как функция от относительной яркости.

Согласно рис. 5.1, образец, воспринимаемый как средне-серый (№5), имеет относительную яркость (или нейтральный коэффициент отражения), равную 20% . Манселловская светлота прочих цветов (независимо от их цветового тона и насыщенности) определяется такими же одномерными взаимоотношениями с относительной яркостью стимула. Таким образом, если известно значение манселловской светлоты, то известна относительная яркость стимула (CIE Y), и наоборот. К сожалению, полином пятого порядка (уравнение 5.1) аналитически необратим и поэтому не имеет практической ценности. Поскольку CIE-шкала светлоты L^* (наряду с другими осями) создана для моделирования манселловской системы, она обеспечивает очень хорошее приближение к манселловской шкале светлоты, которую можно с большой точностью получить путем простого деления на 10 оси CIE L^* (С-осветитель, 2° набл.).

Манселловский цветовой тон

Следующее измерение в манселловской системе — цветовой тон.

Круг цветовых тонов в манселловской системе разделен на пять основных секторов — фиолетовый (Purple), синий (Blue), зеленый (Green), желтый (Yellow) и красный (Red), обозначенных соответственно как 5P, 5B, 5G, 5Y и 5R — и устроен так, что любые иные соседние секторы по всему кругу отличаются друг от друга на одну и ту же величину восприятия. Еще пять промежуточных цветовых тонов обозначаются соответственно как 5PB, 5BG, 5GY, 5YR и 5RP, то есть всего в цветовом круге Манселла 10 основных цветовых оттенков.

Для каждого из перечисленных десяти оттенков существует еще по десять переходных, к примеру, диапазон от 5PB до 5P заполнен: 6PB, 7PB, 8PB, 9PB, 10PB, 1P, 2P, 3P и 4P. Таким образом, весь цветовой круг разбит на 100 одинаковых секторов, отражающих равновеликое изменение ощущения цветового

тона. Промежутки между целыми числами обозначаются десятичными значениями (к примеру, 7.5B).

Манселловская насыщенность

Третье измерение в манселловской системе — насыщенность.

Шкала насыщенностей построена так, что она имеет равные визуальные приращения от нейтральных (нулевых) образцов, по возрастающей — к образцам с максимально выраженным цветовым тоном, но при этом на шкале насыщенностей нет максимума, поскольку наибольшие достижимые насыщенности зависят от цветового тона и манселловской светлоты образцов, а также от состава красок, к примеру: не существует высоконасыщенных образцов с желтым цветовым тоном и низкой светлотой или же с фиолетовым цветовым тоном и высокой светлотой, поскольку особенности ответа зрительной системы человека таковы, что воспроизвести необходимые физические стимулы невозможно.

На рис. 5.2 трехмерная манселловская система показана в двух проекциях: в проекции на плоскость постоянной светлоты (рис. 5.2 [a]) и в проекции на две смежных плоскости постоянного цветового тона (рис. 5.2 [b]). Рис. 5.3 с помощью компьютерной графики демонстрирует аналогичные плоскости системы в 3D-представлении.

Манселловская система характеризует цветовой стимул по параметрам манселловских цветового тона, светлоты и насыщенности, обозначаемых тройками символов: вначале идет светлота, за ней следует цветовой тон, а затем через слэш (/) — насыщенность, к примеру: стимул, вызывающий ощущение красного со средней светлотой и достаточно высокой насыщенностью обозначается как 7.5R5/10 (цветовой тон, светлота/насыщенность).

Манселловский атлас цветов

Физическим воплощением системы Манселла является *Манселловский атлас цветов*, который содержит около 1500 образцов, размещенных на 40 страницах постоянного цветового тона: на каждой странице образцы расположены по возрастанию светлоты (снизу доверху) и насыщенности (от корешка к полям). Образцы атласа — это небольшие закрашенные участки глянцевой и матовой поверхностей, но иногда, к примеру, для экспериментов со зрением или для создания тест-карт характеризации устройств отображения, изготавливают набор образцов большого формата. В 40-х годах прошлого века экспериментальным путем манселловские образцы были приведены к определенным колориметрическим точкам, благодаря чему вся система была размечена заново (Ньюхолл, 1940). Координаты цветности и коэффициент яркости для каждого манселловского образца (включая те, которые трудно или невозможно воспроизвести) можно найти в книге Вышецкого и Стайлса «Наука о цвете» (1982).

Для рассматривания манселловского атласа (или иного набора манселловских образцов) существует колориметрическая спецификация, согласно которой должен использоваться Стандартный двухградусный колориметрический наблюдатель CIE 1931, C-осветитель CIE, средне-серый фон (№5 по Манселлу)

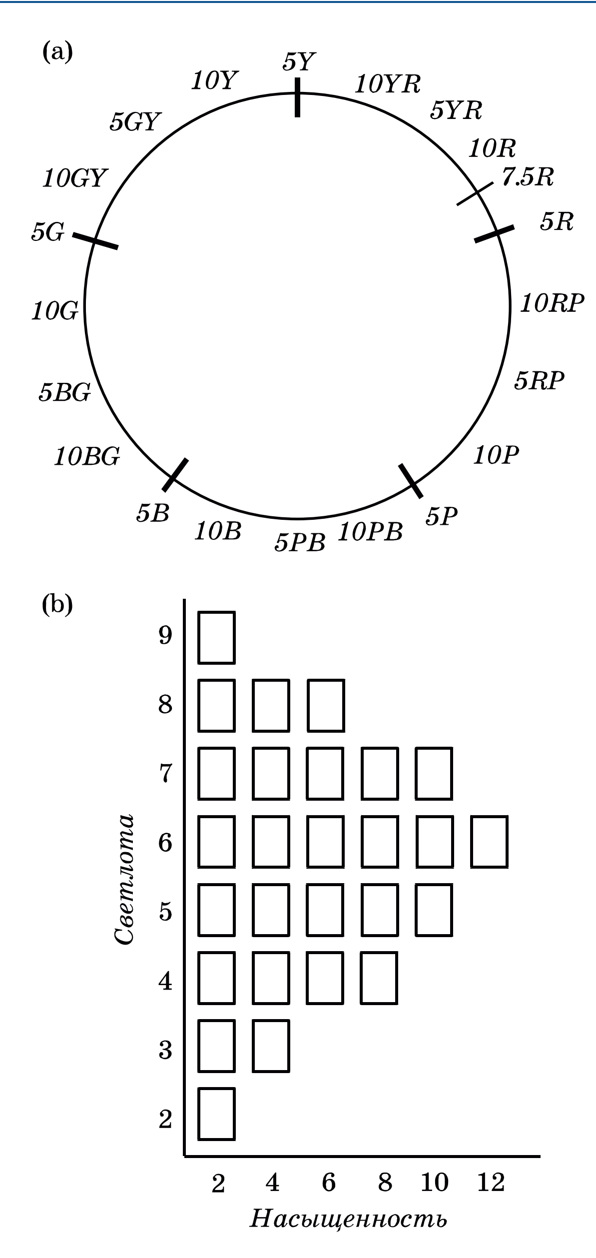


Рис. 5.2 Графическое представление манселловской системы: (a) — цветовой круг; (b) — плоскость манселловской светлоты/насыщенности при постоянном цветовом тоне.

и достаточный уровень освещенности (не ниже 500 lux) — только в таких условиях просмотра система Манселла сохраняет равномерность по восприятию. В иных условиях манселловский атлас уже не будет являться физическим воплощением манселловской системы.

Важно отметить, что манселловская система построена из трех одномерных шкал цветового восприятия, каждая из которых равномерна по своему атрибуту восприятия, но трехмерные взаимоотношения между ее отрезками (то есть цветовые отличия) непостоянны: увеличение манселловской насыщенности на два шага равно изменению цвета образца по манселловской светлоте на один шаг, а размер шага манселловского цветового тона во многом зависит от насы-

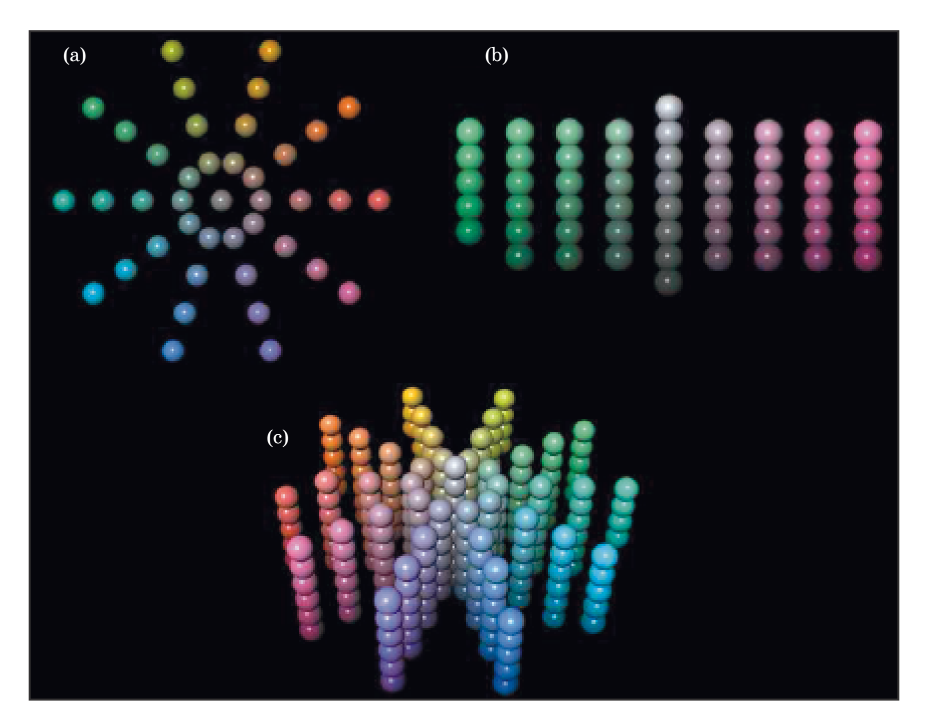


Рис. 5.3 Компьютерная визуализация образцов манселловской системы: (a) — плоскость постоянной светлоты; (b) — две плоскости постоянного цветового тона; (c) — трехмерное представление системы.



Рис. 5.3 доп. Манселловский атлас. Электронную иллюстрацию атласа можно найти по адресу: http://www.gretagmacbeth.com/downloads/100_munsell2-en.zip. — *Прим. пер.*

щенности образцов. Для общего ознакомления с данной проблемой можно рекомендовать работы Бернса (Nickerson Index of Fading, 2000) и Ханта (Munsell system, 1998).

5.3 ШВЕДСКАЯ СИСТЕМА ЕСТЕСТВЕННЫХ ЦВЕТОВ (NCS)

Много позже, в Швеции, Хардом и Сивиком (1981) была разработана «Система естественных цветов» (Natural Color System — NCS), утвержденная как шведский национальный стандарт (SS 01 91 02 и SS 01 91 03) и стандарт ряда европейских стран.

В основу NCS положена оппонентная теория Геринга: цветовой круг разбит на четыре сектора, которым присвоены базовые цветовые тона — красный, желтый, зеленый и синий (рис. 5.4 [a]), расположенные ортогонально с равными значениями шагов между ними. Таким образом, поскольку цветовые тона NCS разбиты на интервалы, равномерные по ощущению — эти интервалы имеют разные значения внутри каждого из четырех секторов; так получилось потому, что, к примеру, разница между базовым красным и базовым синим больше, нежели между базовым желтым и базовым зеленым. Промежуточные тона имеют разметку, отражающую перцепционное смешение двух соседних базовых цветовых тонов (например, оранжевый воспринимается как срединный между базовым красным и базовым желтым и обозначается как Y50R).

Оставшиеся два измерения цветового восприятия в шведской цветовой системе расположены на трехлинейных осях (рис. 5.4 [b]): углы треугольника символизируют цвета с максимальными белизной (whiteness — w), чернотой (blackness — s) и хроматичностью (chromaticness — c), в сумме дающих 100. Таким образом, образец с максимальной чернотой обозначается как $s = 100$, $w = 0$, $c = 0$; образец с максимальной белизной — как $s = 0$, $w = 100$ и $c = 0$. Поскольку в сумме три значения дают 100, для полной спецификации цветового ощущения необходимы только два из них (в совокупности со значением цветового тона). Обычно используют хроматичность и черноту, к примеру: некий промежуточный образец может быть обозначен как $s = 20$ и $c = 70$ с остатком на белизну $w = 10$.

Максимальная хроматичность по каждому цветовому тону определена по максимально хроматичному воображаемому образцу данного тона, таким образом, между манселловской насыщенностью и NCS-хроматичностью не существует прямой взаимосвязи, и ясно также, что не существует прямой связи между NCS-чернотой и манселловской светлотой. Важно отметить, что образцы с максимальной хроматичностью на разных цветовых тонах разнятся по относительной яркости и светлоте.

Манселловская и NCS-системы — это два разных пути спецификации цветового восприятия, причем нельзя сказать, что один лучше другого, поскольку они совершенно разные.

Сравнительно недавно ISO вновь обратилась к 31-му техническому комитету МКО (CIE TC-31, 1996) с просьбой рекомендовать в качестве международного стандарта какую-либо одну из упомянутых цветовых координатных систем,

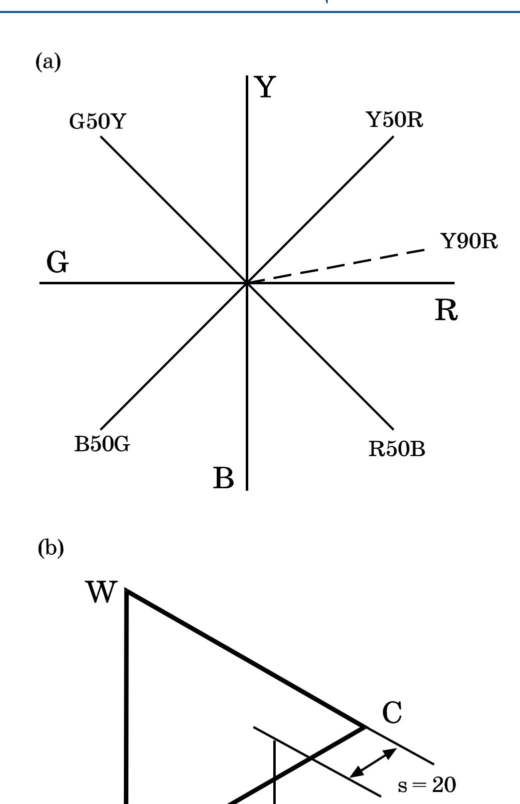


Рис. 5.4 Графическое представление NCS-системы: (a) — цветовой круг; (b) — плоскость NCS-черноты/хроматичности при постоянном цветовом тоне.

а также метод конверсии между двумя этими системами, но комитет экспертов заключил, что такая задача невыполнима.

В NCS-системе цветовое ощущение обозначается через *s* (черноту), хроматичность (*c*) и цветовой тон, к примеру: стимул с манселловскими координатами 7.5YR5/10 в NCS-системе будет обозначен как 20, 70, Y90R, это означает, что по ощущению цветового тона образец лежит неподалеку от базового красного с примесью 10% желтого, а хроматичность образца достаточно высока (70%) при небольшой примеси черноты (20%). Отметим, что образец со средней манселловской светлотой в NCS-системе будет иметь относительно низкую черноту (высокую белизну). Сказанное иллюстрирует фундаментальное отличие между манселловской шкалой светлоты и NCS-шкалой белизны-черноты-хроматичности.

Аналогично манселловской, NCS-система воплощена в виде атласа и специфицирована CIE-трехстимульными значениями, которые, напомним, основаны на масштабных визуальных экспериментах. NCS-атлас включает в себя 40 цветовых тонов (на каждый цветовой тон по 10 образцов с одинаковым шагом по шкалах черноты и хроматичности).

Из-за ограниченности цветового охвата красок невозможно воспроизвести все необходимые образцы, поэтому в атласе их всего около 1500.

Рассматривать NCS-атлас нужно только при дневном свете на определенном фоне и при определенных уровнях фотометрической яркости.

NCS-образцы, также как и образцы манселловского атласа, выпускаются разного размера.

Как национальный стандарт NCS существует совсем недавно, но очень широко применяется в шведских системах цветокоммуникации, обеспечивая при этом завидный уровень точности в бытовом обмене цветовой информацией.

5.4 ЦВЕТОСПЕКТРАЛЬНАЯ КООРДИНАТНАЯ СИСТЕМА

Сравнительно недавно была создана цветовая координатная система, получившая название «Цветоспектральная координатная система»[1] (Станциола, 1992), которая была сконструирована как цветокоммуникационная, представляющая собой комбинацию системы цветового восприятия с системой смешения цветовых стимулов. Система построена так, что, во-первых, цвета (большинства поверхностей. — *Прим. пер.*) могут быть специфицированы целиком в ее пределах и, во-вторых, по каждому образцу (для выявления цветового соответствия с разными материалами и носителями) могут быть использованы данные спектрального коэффициента отражения, — таким образом, каждый образец в системе описан не только его колориметрическими координатами, но также и его спектральными свойствами.

В качестве отправной точки цветоспектральная система задействует CIELAB-цветовое пространство.

Для создания оси светлоты были выбраны 18 различных уровней L^*: диапазон уровней L^* от 30 до 95 разбит на шаги по 5 единиц с добавкой нескольких дополнительных уровней к высоким светам, что имеет специфическую ценность в дизайне (к примеру, стены помещений, как правило, красят в светлые тона). На каждом уровне светлоты выделяют по 9 опорных точек, которые содержат один серый ($a^* = 0$, $b^* = 0$) и восемь хроматических цветов с насыщенностью $C^* = 60$. Хроматические опорные точки: красная (60,0), оранжевая (42.5, 42.5), желтая (0, 60), желто-зеленая (−42.5, 42.5), зеленая (−60.0), сине-зеленая (−42.5, −42.5), синяя (0, −60) и фиолетовая (42.5, −42.5). Таким образом, опорные точки закладывают идеологическую основу пространства цветового восприятия.

Дополнительная часть системы построена на принципе аддитивного смешения цветовых стимулов: каждый сектор плоскости CIELAB a^*b^* разбит на прямоугольные образцы, представленные аддитивной смесью серой и трех хроматических опорных точек. Равные шаги в системе представляют равные адди-

[1] Оригинальное название системы звучит как «Система цветовых кривых» (Colorcurve system) и представляется крайне неудачным ввиду явного противоречия понятию «цвет» (последнее становится ясным из контекста данного параграфа); поэтому, на основании истинного смысла системы, здесь и далее ее название будет переводиться как «Цветоспектральная координатная система». — *Прим. пер.*

тивные смеси четырех опорных точек — по этому принципу построены все точки цветоспектральной системы. Образцы были подобраны так, что при помощи реальных пигментов удалось получить требуемые кривые спектрального коэффициента отражения.

Физически система воплощена в виде двух атласов, выполненных на бумаге, покрытой нитроцеллюлозным лаком. «Мастер-атлас» содержит около 1200 образцов 18-ти уровней светлоты, но существует также дополнительный «Серо-пастельный атлас», составленный из 956 дополнительных образцов, которые наилучшим образом представляют около-серую и пастельную область цветового пространства. Поскольку цветоспектральная система описана спектральными коэффициентами отражения образцов, характер освещения не имеет значения до тех пор, пока соответствие образцов рассчитывается на основе спектральных данных: если спектральное соответствие имеется, то в цветоспектральной системе образцы при любом освещении обеспечат соответствие визуальное (что невозможно в других цветовых координатных системах).

Подобно другим координатным системам, цветоспектральная система может выпускаться с разными формами и размерами образцов.

Особый интерес представляет одно из специфических свойств цветоспектральной координатной системы — то, что в ее атласах образцы имеют круглую форму, а не квадратную (как в большинстве систем). Это позволяет уйти от двух потенциальных проблем:

1. Иллюзии тонального контраста между образцами из-за появления темных пятен в их углах (псевдосетка Германа).
2. Эффекта искривления образцов.

5.5 ПРОЧИЕ КООРДИНАТНЫЕ СИСТЕМЫ

В изучении моделей цветового восприятия особенно важны Манселловская и NCS-системы, описанные выше, а цветоспектральная система — это весьма любопытная комбинация системы цветового восприятия с системой, основанной на принципах аддитивного смешения цветовых стимулов, которая дает нам полезный и удобный набор образцов для изучения цветового восприятия и законов цветового репродуцирования. Однако существует множество других координатных систем, созданных в разных целях; детально их описали Дерефельд (1991) и Стайлс с Вышецким (1982), но мы все же должны рассмотреть «Равномерные цветовые шкалы OSA», DIN-систему и систему Оствальда.

Равномерные цветовые шкалы OSA

В 1997 г. Американское Оптическое Общество (Optical Society of America — OSA) учредило комитет по созданию Системы равномерных цветовых шкал (Uniform Color Scales — UCS). Результатом работы данного комитета (которая подробно описана Мак-Адамом, 1974, 1978) стало создание «OSA-системы равномерных цветовых шкал (OSA UCS)». OSA-система — это система цветового восприятия, но по своей сути она существенно отличается от манселловской и NCS-систем.

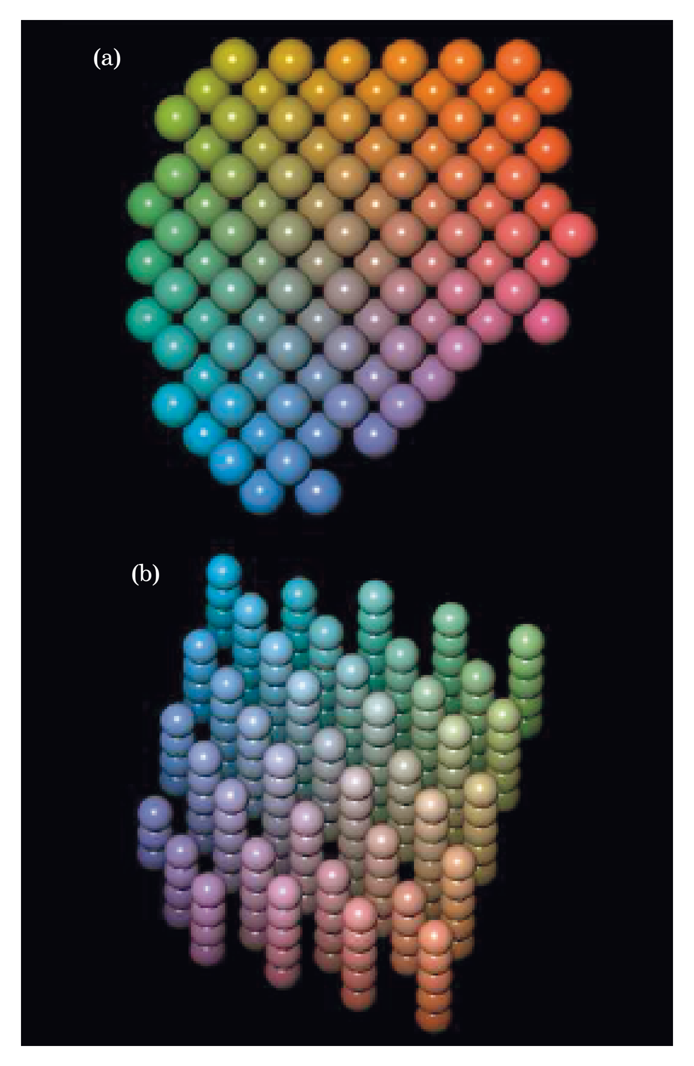


Рис. 5.5 Графическое представление системы OSA UCS: (a) — две смежные плоскости постоянной светлоты; (b) — трехмерное представление.

OSA-пространство — это трехмерное эвклидово пространство, где *L*-, *j*- и *g*-оси представляют соответственно светлоту, желтизну-синеву и красноту-зелень. Принцип OSA UCS таков: данный образец равноотличен по цветовому ощущению от соседних в трехмерном цветовом пространстве, а не просто по одному из измерений, как, скажем, в системе Манселла.

Для того чтобы каждый образец в трехмерном пространстве равноотстоял от соседних, необходимо, чтобы он имел правильную ромбоэдрическую форму, имея при этом соответственно по 12 равноудаленных соседей. Если образец соприкасается с соседними образцами в 12-ти точках, то результирующий многогранник будет кубооктаэдром и прямоугольные плоскости образцов данного цветового пространства будут видны под любым углом просмотра.

На рис. 5.5 (a) показана компьютерная модель двух смежных плоскостей постоянной светлоты, иллюстрирующих принципиальную схему OSA-системы. На рис. 5.5 (b) система показана в трехмерном представлении.

Ясно, что стремление получить равные цветовые отличия по всем направлениям ведет к тому, что данная координатная система и другие системы существенно разнятся между собой, и хотя из-за своей сложной геометрии (и отсутствии физического воплощения) OSA-система непопулярна, она дает нам набор особых данных, также весьма полезных в развитии моделей цветового восприятия и моделей цветовых отличий.

Существуют формулы преобразования CIE-координат в *L*-, *j*- и *g*-координаты OSA-системы, но, к сожалению, эти уравнения необратимы, что снижает их прикладную ценность. Формулы и поточечную спецификацию OSA-системы можно найти у Вышецкого и Стайлса (1982).

DIN-система

В основу созданной в Германии DIN-системы (Deusches Institut fur Normung) положены три перцепционных параметра: цветовой тон (hue), чистота цвета (saturation) и темнота (darkness).

Спецификация цветов DIN-системы очень близка к колориметрической спецификации диаграмм цветностей: цвета с постоянным цветовым тоном располагаются на диаграмме цветностей по линиям постоянной (или дополнительной) длины волны (то есть по прямым линиям, радиально расходящимся от белой точки). Цвета с постоянной DIN-чистотой представляют постоянные цветности, то есть взаиморасположение образцов по DIN-цветовому тону и чистоте основано на принципе равномерности восприятия.

DIN-темнота зависит от отражательной способности того или иного образца, взятой относительно идеального образца (то есть образца либо отражающего всю упавшую световую энергию по всем длинам волн, либо полностью поглощающего ее), и относится ко всем образцам с данной цветностью, формируя при этом шкалу темноты (идеологически более близкую к NCS-черноте, нежели к манселловской светлоте).

DIN-система физически воплощена в виде «DIN-цветовой карты» и включает в себя страницы постоянного цветового тона с прямоугольными образцами, меняющимися по темноте и чистоте цвета, — таким образом, колонки на DIN-странице представляют собой постоянную цветность (DIN-чистоту) и выглядят подобно теневым рядам (то есть подобно отдельному образцу при различных уровнях освещенности одним и тем же источником).

DIN-карты дают нам возможность убедиться в том, что отличия по цветности снижаются по мере усиления темноты, поэтому нижний ряд любой DIN-страницы неизменно черный.

Историческую справку о DIN-системе дают Ричер и Витт (1986).

Система Оствальда

Система Оствальда широко используется в живописи и дизайне, но для нас она представляет лишь исторический интерес (Дерефельд, 1991). Подобно NCS, система Оствальда основана на геринговской оппонентной теории, однако оствальдовская система все-таки ближе к цветоспектральной, которая пред-

ставляет собой комбинацию системы цветового восприятия с системой аддитивного смешения цветовых стимулов.

Для создания цветового круга Оствальд использовал четыре геринговских базовых цветовых тона, но не стал при этом располагать оппонентные цветовые тона друг против друга, а воспользовался т.н. колориметрическими дополнениями, связав цветности прямой линией, проходящей через белую точку их диаграммы и задав тем самым оппозитные реперы цветового круга.

Система Оствальда также включает в себя трилинейное представление белого содержимого, черного содержимого и полноцветного содержимого по каждой из плоскостей постоянного цветового тона, и если в NCS-системе эти плоскости определены согласно цветовым шкалам, то в системе Оствальда они определены аддитивной смесью цветовых стимулов, расположенных в углах треугольников. Таким образом, система Оствальда хоть и основана на цветовом восприятии, но ее образцы оказываются расположенными по принципу аддитивного смешения цветовых стимулов (что сильно напоминает идеологию относительно новой цветоспектральной системы, основанной на CIELAB).

5.6 ПРИМЕНЕНИЕ ЦВЕТОВЫХ КООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ

Цветовые координатные системы находят широкое применение в изучении цветового восприятия, а также в смежных областях: экспериментальной работе, дизайне, связи, образовании, тестировании моделей цветового восприятия, создании тест-карт характеризации устройств визуализации и многих-многих других сферах деятельности, где могут быть полезны атласы (или иные физические представления) координатных систем.

Цветовые координатные системы в экспериментах со зрением

Зачастую в экспериментах со зрением возникает необходимость сравнивать и/или подбирать соответствие различных цветовых стимулов в различных условиях просмотра. Для таких экспериментов цветовые координатные системы являются удобным предметным пособием, к примеру: для шкалирования данных цветового эксперимента исследователь может выбрать образцы манселловского атласа, атласа NCS, цветоспектральной системы и т.п. Характеристики образцов хорошо известны, пояснения к ним опубликованы, благодаря чему исследователи могут дать четкое и однозначное описание цветовых стимулов, которое в дальнейшем можно использовать при повторе этих экспериментов. Отметим, что в координатных системах ценность представляют не только фактические образцы с маркировкой, но также и спектральные характеристики образцов.

Одновременное использование нескольких координатных систем в экспериментах по изучению цветового восприятия вовлекает наблюдателей в научный процесс и способствует дальнейшему развитию этих систем, в частности, за счет того, что наблюдатели сами маркируют образцы, рассматриваемые в тех или иных условиях освещения (особенно полезным является использование манселловской и NCS-систем). Для создания и тестирования моделей цветово-

го восприятия очень важно то, что такая работа позволяет детально описать изменения в цветовых ощущениях, вызываемые изменениями в условиях просмотра, а также давать колориметрическую спецификацию каждого образца при тех или иных условиях наблюдения.

Цветовые координатные системы в живописи и дизайне

Цветовые координатные системы часто применяются в живописи и дизайне — сам принцип порядкового расположения цветов позволяет дизайнерам легко выбирать образцы с теми или иными цветовыми взаимоотношениями, к примеру: с помощью манселловской системы легко выбрать диапазон цветов с постоянным цветовым тоном или постоянной светлотой или к некоему цветовому тону подобрать дополнительный, руководствуясь тем или иным принципом. Системы смешения цветовых стимулов дают художникам понимание того, как воспроизвести желаемый цвет на том или ином носителе.

Цветовые координатные системы — это не только инструментарий дизайнера, но также и средство обмена информацией о цвете, позволяющее точно указывать производителям, какой именно цвет материала хотят использовать в данном дизайнерском проекте.

Цветовые координатные системы и обмен информацией о цвете

Ясно, что цветовые координатные системы обеспечивают точный обмен информацией о цветовом восприятии, причем в обоих направлениях, но только тогда, когда атласы систем используются в предписанных условиях просмотра.

Хорошо известно, что колориметрические координаты дают максимально точную, четкую и удобную спецификацию цветов, но их перцепционное значение не столь очевидно, в то время как цветовые координатные системы вполне могут обеспечить удобное средство обмена информацией о цвете.

Системы также могут быть полезны и тем, кто знаком с ними теоретически, но при этом не является владельцем атласа: к примеру, в ANSI-спецификации по рассматриванию цветных изображений (ANSI 1989) фоны изображений описаны значениями манселловской светлоты, тогда как, казалось бы, величины коэффициента отражения вполне достаточно и она априори точнее.

Цветовые координатные системы в образовании

Цветовые координатные системы крайне полезны в деле изучения цветового восприятия (и в прочих аспектах науки о цвете). Например, рассматривание манселловского атласа дает визуальную иллюстрацию трех атрибутов цветового восприятия — светлоты, цветового тона и насыщенности: просмотр страниц атласа при переходе от низких уровней яркости образцов к высоким — это прекрасная демонстрация роста субъективной яркости и полноты цвета при постоянстве светлоты и насыщенности.

DIN-система полезна для демонстрации отличий между насыщенностью и чистотой цвета, а также того, как чистота связана с теневыми рядами (еди-

ничный объект при переходе ко все более и более низким уровням освещенности при неизменном спектральном распределении энергии источника).

Ограничения координатных систем также имеют образовательную ценность, к примеру: в манселловской системе постоянная светлота определена как постоянная относительная яркость, однако хорошо известно, что при повышении насыщенности образцов (при постоянной относительной яркости стимулов) ощущение светлоты растет (эффект Гельмгольца — Кольрауша; см. главу 6), то есть главный образовательный смысл манселловских серий образцов постоянной светлоты (и переменной насыщенности) — проиллюстрировать степень и систематичность изменения светлоты.

Наконец, системы, подобные NCS, ценны как иллюстрация оппонентной теории цветового зрения, особенно в разметке цветовых тонов (которая очень близка к физиологическому кодированию цвета).

Цветовые координатные системы в математической оценке моделей цветового восприятия

Поскольку цветовые координатные системы (подобные манселловской или NCS) основаны на перцепционных шкалах цветового восприятия, они поставляют нам данные, которые могут оказаться полезными в математической оценке моделей цветового восприятия. К примеру: поскольку манселловская система включает в себя плоскости с постоянными светлотой и цветовым тоном, а также цилиндрические поверхности постоянной насыщенности, то трехстимульная спецификация манселловской системы может быть конвертирована в т.н. *предикторы* («предсказатели». — *Прим. пер.*) цветового ощущения той или иной модели цветового восприятия, что в конечном итоге дает нам возможность проследить, насколько хорошо предугаданы контуры постоянного цветового тона, светлоты и насыщенности. Такая оценка обеспечивает удобную и вполне доступную для понимания технику сравнения различных моделей цветового восприятия. Сопоставление прогнозов манселловского и NCS-контуров в различных моделях также углубляет наше понимание фундаментальных отличий между этими двумя системами.

Цветовые координатные системы в системах визуализации изображений

Цветовые координатные системы можно использовать в качестве исходного материала для создания тест-карт характеризации систем отображения или контроля измерительных устройств, к примеру: Macbeth Color Checker Chart (Мак-Ками и др., 1976) — это карта, частично основанная на образцах манселловской системы и обычно используемая для характеризации систем отображения. Несмотря на широкую распространенность, Macbeth Color Checker Chart включает в себя лишь малую часть образцов (всего 24), которые, конечно же, не заполняют цветового пространства, тогда как компанией GretagMacbeth вполне могли бы выпускаться мишени, приносящие гораздо большую практическую пользу.

Образцы от различных цветовых координатных систем можно использовать для создания персональных пользовательских тест-карт, поскольку эти образцы можно четко описать и скопировать.

Ограничения цветовых координатных систем

Несмотря на то, что цветовые координатные системы в деле изучения и описания цветового восприятия весьма полезны, они не могут заменить собой его модели, поскольку имеют два серьезных ограничения:

1. ЦКС не могут математически описать взаимоотношения с физически измеряемыми величинами, и хотя манселловская и NCS-системы имеют колориметрические спецификации на каждый образец, не существует формул пересчета колориметрических координат в координаты восприятия. Путем статистической подгонки (statistical fitting) и моделирования т.н. нейронных сетей были получены лишь приблизительные формулы пересчета; самым же надежным методом преобразования CIE-координат в координаты цветовой координатной системы до сих пор является только т.н. LUT-интерполяция (интерполяция по таблице соответствий). Ясно также, что недостаток прямых математических определений не дает возможности аналитической инверсии этих моделей.

2. Описанные ЦКС создавались как шкалы цветового восприятия для тех или иных конкретных условий просмотра и не несут никакой информации об изменениях в цветовом восприятии, вызванных изменениями в этих условиях.

5.7 ЦВЕТОВЫЕ ИМЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Существует множество вполне доступных систем цветовой спецификации, многие из которых, несмотря на широкое применение, не являются истинными цветовыми координатными системами. Поскольку такие системы построены без учета принципа перцепционной последовательности (хотя некоторые из них созданы согласно логике процессов воспроизведения изображений) и без учета условий просмотра, вернее будет называть их Цветовыми именными системами. Плюс к тому, физическое воплощение этих систем никак не проконтролировано колориметрически, что было бы необходимо для точного обмена данными о цвете образцов. Примерами являются: Pantone-, Toyo-, Focoltone- и Trumatch-системы.

Пантонная система

Главным компонентом пантонной системы является *Pantone Color Formula Guide* — веер, содержащий 1012 спотовых краскосмесей, нанесенных на мелованную и немелованную поверхности. Каждый образец имеет идентификационный номер, который может быть использован для установки связи желаемого цвета с процессом печати (перед которым спотовые краски должны быть смешаны на основании пантонных рецептур), в результате чего цвет отпечатанного образца должен оказаться относительно близким к цвету образца на веере.

Система Pantone Color Formula Guide — это основной инструмент спецификации спотовых цветов, по крайней мере в США.

Система *Pantone Process Color Imaging Guide* включает в себя 942 цветовых образца, демонстрирующих пантонные спот-цвета, которые можно более или менее удовлетворительно имитировать с помощью триадного (CMYK) процесса (спотовые образцы при этом расположены вплотную к триадным имитатам, дабы продемонстрировать возможные отличия).

Trumatch-система

Trumach Colorfinder — это веер, включающий в себя боле 2000 триадных образцов, принцип расположения которых чуть более «перцепционный», чем в пантонной системе, то есть позволяет пользователям компьютеров выбирать нужную CMYK-комбинацию согласно непосредственному восприятию отпечатанных образцов, дабы не полагаться на приблизительное CRT-экранное отображение той или иной CMYK-комбинации. Пользователи находят необходимый образец в веере, устанавливают нужную область в изображении на ту же CMYK-комбинацию и, несмотря на часто неверный экранный цвет, могут быть уверены в том, что цвет отпечатка будет довольно близким к цвету образца в веере.

Прочие системы

Наряду с пантонной и Trumatch-системой, которые можно использовать как набор иконок, описывающих цвет отпечатанных объектов, существует *PostScript Process Color Guide* (опубликован AGFA), содержащий 16 000 образцов триадных смесей, представляющих полный набор CMY-комбинаций (от 0% до 100% заполнения точками, с шагом в 5%), и дополнительные образцы, включающие в себя четыре различных уровня генерации черного. Образцы отпечатаны на мелованных и немелованных бумагах.

Учитывая вариабельность печатных красок, бумаг и процессов, данная система может рассматриваться лишь как приблизительное руководство. Известно также, что вееры не очень стабильны и рекомендуется менять их примерно раз в полгода. В то же время наличие PostScript Process Color Guide все-таки намного лучше, чем его отсутствие и/или работа на некалиброванных/нехарактеризованных цветовоспроизводящих устройствах. Однако, конечно же, система, в которой все устройства отображения тщательно калиброваны и характеризованы, а условия просмотра тщательно проконтролированы и учтены, окажется способной к намного более точному цветовоспроизведению (в рамках своего цветового охвата, разумеется), чем ручной подбор CMYK-комбинаций по PostScript Process Color Guide.

Для воспроизведения внегамутных цветов (таких, как, к примеру, цвета металлизированных красок, которые не могут быть имитированы на двухмерном мониторе) система вееров по-прежнему незаменима.

6 ФЕНОМЕНЫ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

В третьей главе мы сформулировали фундаментальные положения базовой колориметрии. Однако несмотря на то, что система CIE чрезвычайно эффективна, всегда нужно помнить, что она имеет серьезные ограничения, так как построена на трехстимульных значениях, точно описывающих цветовое соответствие для усредненного наблюдателя, но не несущих никакой информации, характеризующей само цветовое ощущение. Последнее — сфера деятельности моделей цветового восприятия.

О трехстимульных значениях мы говорим как о номинальных (или, в лучшем случае, как о порядковых) шкалах цвета, которые можно использовать лишь для ответа на вопрос: есть визуальное соответствие двух стимулов или нет? Спецификация цветовых отличий требует интервальных шкал, а описание цветового восприятия — интервальных шкал для цветового тона (hue) и пропорциональных шкал для субъективной яркости, светлоты, полноты цвета и насыщенности.

Таким образом, чтобы перейти от трехстимульных значений к перцепционным размерностям, нужна некая дополнительная информация, позволяющая повысить ранг сложности шкал. Где найти такую информацию? Почему она необходима? В чем «ущербность» трехстимульной колориметрии? На эти вопросы можно ответить, исследуя различные феномены цветового восприятия, часть из которых описана в данной главе. Интересовать нас будут те явления, что не могут быть описаны с помощью классической трехстимульной колориметрии. Понимание причин и природы этих явлений позволит нам строить модели цветового восприятия.

6.1 ЧТО ТАКОЕ ФЕНОМЕНЫ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ?

Для усредненного наблюдателя два стимула с одинаковыми трехстимульными значениями CIE *XYZ* будут соответствовать друг другу по цвету до тех пор, пока соблюдается ряд условий:

— определенный ретинальный локус стимуляции;

— определенный угловой размер области стимуляции[1];

— определенный уровень фотометрической яркости стимула.

Плюс к тому, оба стимула должны иметь одинаковые окружения, фоны, размеры, формы, характеристики поверхности, геометрии освещенности поверхности и т.п. Если хотя бы одно из перечисленных условий нарушено, то вполне вероятно, что цветовое соответствие исчезнет. Однако на практике ус-

[1] 2° или 10°. —*Прим. пер.*

ловия, необходимые для успешного прогноза цветового соответствия на базе простой трехстимульной колориметрии, часто не могут быть соблюдены, и для этих случаев нужна расширенная, высшая колориметрия, учитывающая изменчивость перечисленных выше факторов. Такой высшей колориметрией являются модели цветового восприятия.

Различные явления, «разрушающие» простую трехстимульную XYZ-систему, и составят предмет разговора в ближайших параграфах данной главы. В качестве примера приведем один из феноменов цветового восприятия, именуемый *симультанным контрастом* или *индукцией*: на рис. 6.1 (a) показаны два серых патча с одинаковыми XYZ-значениями, которые соответствуют друг другу по цвету, но только до тех пор пока рассматриваются в одинаковых условиях (оба на одном и том же сером фоне). Если один патч поместить на черный фон, а другой патч на белый (рис. 6.1 [b]), то они перестанут совпадать друг с другом по визуальному ощущению, но при этом их трехстимульные значения останутся неизменными. Следовательно, с того момента, как нарушается идентичность условий наблюдения стимулов (рис. 6.1 [b]), трехстимульная колориметрия перестает прогнозировать соответствия, и вместо нее требуется модель, учитывающая эффект влияния яркости фона на цветовое восприятие.

Симультанный контраст — это всего лишь один из множества феноменов цветового восприятия, описанных в данной главе: разговор об остальных будет касаться влияния окружения, уровня фотометрической яркости, цвета освещения, когнитивной интерпретации и прочих параметров наблюдения. Перечисленные явления требуют создания и развития моделей цветового восприятия, а также определения типа входных данных и типа выходных предикторов.

6.2 СИМУЛЬТАННЫЙ КОНТРАСТ, ОКОНТУРИВАНИЕ И СМАЗЫВАНИЕ

Симультанный контраст, оконтуривание и смазывание — это феномены цветового восприятия, которые непосредственно связаны с пространственной структурой стимулов.

Симультанный контраст

Рисунок 6.1 демонстрирует эффект *симультанного контраста*: два идентичных серых патча, расположенные на различных фонах, воспринимаются по-разному: черный фон заставляет серый патч казаться светлее, в то время как белый фон делает серый патч более темным. Симультанный контраст ведет к сдвигу цветового восприятия, когда меняется цвет фона стимулов, и этот сдвиг целиком ложится в оппонентную теорию цветового зрения — ощущение контраста находится в рамках оппонентных размерностей. Иными словами: светлый фон индуцирует восприятие стимула как более темного, темный фон провоцирует более светлое ощущение, красный индуцирует зеленое цветовое ощущение, зеленый — красное, желтый — синее и синий индуцирует желтое цветовое ощущение.

Джозеф Альберс (1963) в своей классической работе «Цветовое взаимодей-

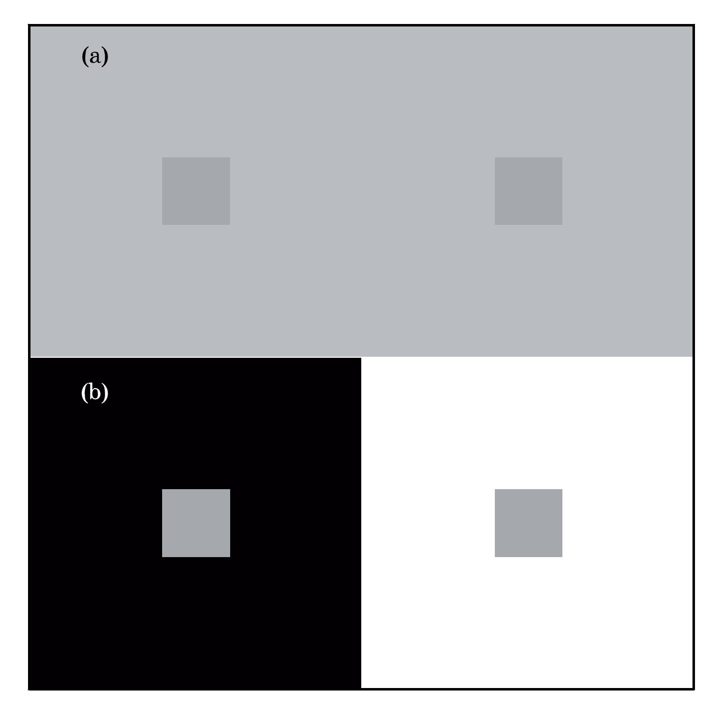


Рис. 6.1 Пример симультанного контраста: серые патчи на сером фоне (a) физически идентичны таковым на белом и черном фонах (b).

ствие» рассматривает различные аспекты симультанного контраста и учит художников и дизайнеров тому, как избежать ловушек и использовать эффекты симультанного контраста в своих целях. Более полное исследование данного явления можно найти в классических работах Гурвича (1981), Бойнтона (1979) и Эванса (1948). Корнелиссен и Бреннер (1991) описывают взаимоотношения между адаптацией и хроматической индукцией, основываясь на том постулате, что индукцию можно объяснить как минимум локальной хроматической адаптацией. Блэквелл и Бучсбаум (1988) описывают некоторые пространственные и хроматические факторы, влияющие на степень индукции.

Робертсон (1996) приводит интересный пример хроматической индукции, выдвигающий на первый план сложную пространственную природу данного феномена (рис. 6.2): красные квадраты (рис. 6.2 [a]) или голубые квадраты (рис. 6.2 [b]) окружены одинаковыми цветными гранями — две желтых и две синих грани на каждый квадрат. Если бы хроматическая индукция зависела только от цвета граней, то все красные квадраты и все голубые квадраты воспринимались бы сходным образом. Однако из рис. 6.2 ясно, что квадраты, которые *кажутся* расположенными на желтых полосках, подвергаются индукции желтого и поэтому воспринимаются темнее и синее, а квадраты, якобы расположенные на синих полосках, воспринимаются светлее и желтее. Очевидно, что симультанный контраст между стимулами больше зависит от их пространственного взаиморасположения, нежели от цвета граней. Данный феномен, известный как эффект *хроматического разбеливания*, всегда считался результатом когнитивной и «вычислительной» обработок. Блэкесли и Мак-Курт (1999)

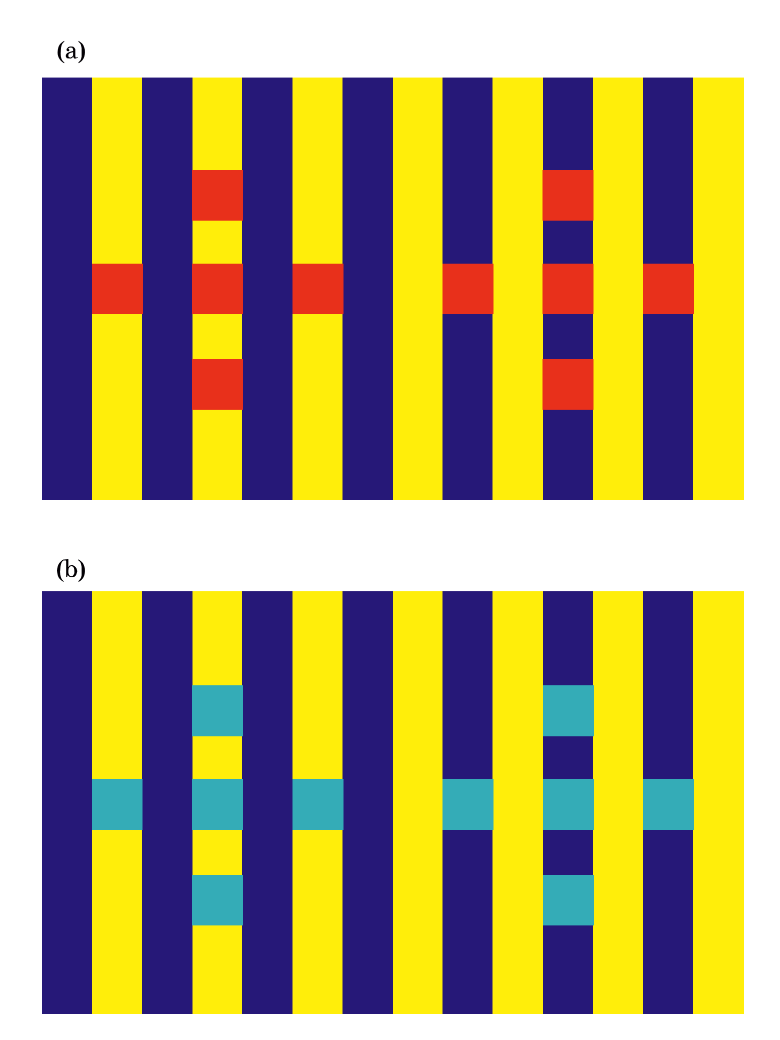


Рис. 6.2 Паттерны стимулов, иллюстрирующие сложность симультанного контраста. Локальные контрасты квадратов левой и правой позиций одинаковы. Однако симультанный контраст создает эффект целостности полос, на которых якобы расположены квадратные патчи. Наклоните страницу и обратите внимание на усиление эффекта.

дают любопытный пример модели т.н. машинного зрения, прогнозирующей данный эффект.

Оконтуривание

Следующий феномен тесно связан с предыдущим и именуется *оконтуриванием*. Оконтуривание повышает величину цветовых отличий, когда фон, на котором сравниваются стимулы, сходен по цвету с этими стимулами: на рис. 6.3 показана оконтуривание пары серых образцов — отличие по светлоте между двумя серыми стимулами, расположенными на сером фоне, больше, чем между серыми стимулами на белом или черном фонах. Подобные эффекты возникают и в отношении хроматических отличий.

Семмерлот (1970) издал масштабный труд, посвященный изучению эффекта оконтуривания и созданию модели прогнозирования этого феномена.

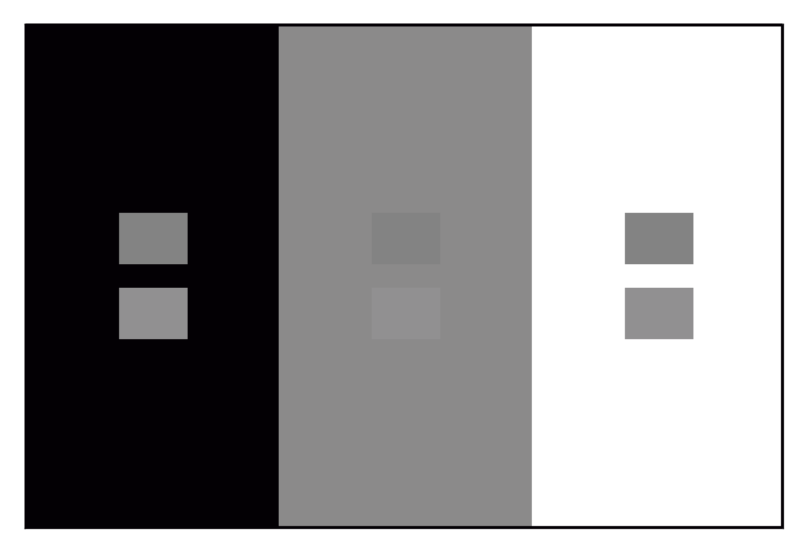


Рис. 6.3 Пример оконтуривания: пары серых патчей физически идентичны на всех трех фонах.

Смазывание

Если растет пространственная частота стимулов или если стимулы уменьшаются в размере, эффект симультанного контраста исчезает и заменяется эффектом смазывания. *Смазывание* — это результат смешения исследуемого цветового стимула со стимулом окружения. Данный эффект возникает в т.н. точке слияния, т.е. при том уровне пространственной частоты, когда стимулы более не воспринимаются как дискретные, но как единый стимул (подобно тому как в полутоновом изображении при определенной дистанции просмотра перестают различаться отдельные точки). Однако смазывание возникает на меньших пространственных частотах, чем те, на которых происходит слияние, и хотя стимулы все еще остаются отличными от фона, их цвета начинают смешиваться.

Классические лекции Чевреула (1839) раскрывают важность эффектов смазывания и симультанного контраста в текстильном деле, где часто стараются сохранить цветовое восприятие элементов дизайна несмотря на изменения в их пространственной конфигурации и цвете фона: текстильным дизайнерам приходится менять цвета всех элементов ткани, дабы сохранить их цветовое восприятие.

Сходный (хотя и более сложный) феномен известен как «неоновое смазывание» (Брессман, 1993). Неоновое смазывание — это любопытная комбинация эффектов смазывания и прозрачности.

Рис. 6.4 по одной цветовой размерности (цветовому тону. — *Прим. пер.*) одновременно демонстрирует симультанный контраст и смазывание. Колориметрически ахроматичные патчи с разной пространственной частотой расположены на красном фоне: на низкочастотных (больших) патчах имеет место симультанный контраст, и патчи воспринимаются слегка зеленоватыми; однако на высоких пространственных частотах (маленькие патчи) возникает смазыва-

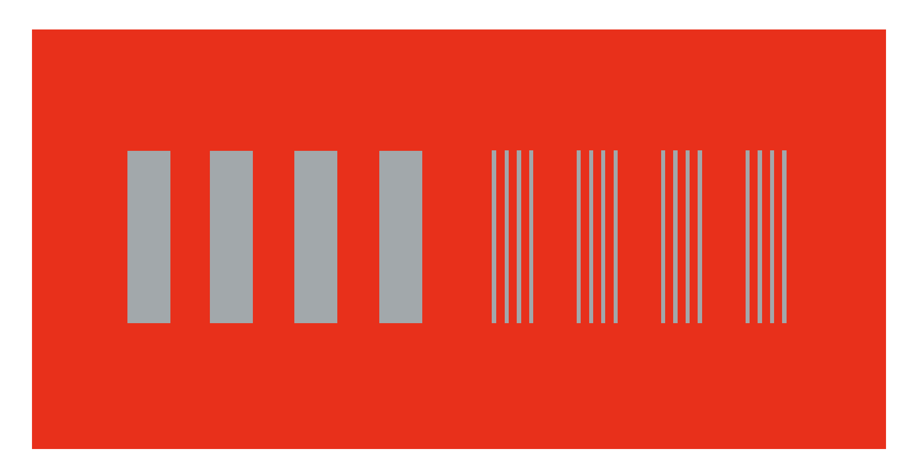


Рис. 6.4 Демонстрация отличий между симультанным контрастом и смазыванием: все серые области физически идентичны, но на красном фоне воспринимаются по-разному — в зависимости от их относительного пространственного размера.

ние, и патчи воспринимаются розоватыми. Зависимость от пространственной частоты можно отследить, меняя расстояние просмотра рис. 6.4.

Симультанный контраст и смазывание указывают на латеральное взаимодействие клеток и адаптационные эффекты в зрительной системе человека.

6.3 ЭФФЕКТ БЕЦОЛЬДА — БРЮККЕ (ЗАВИСИМОСТЬ ЦВЕТОВОГО ТОНА ОТ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ)

Часто полагают, что цветовой тон можно специфицировать длиной волны монохроматического излучения. К сожалению, дело обстоит иначе, что иллюстрируют феномены наподобие эффекта Бецольда — Брюкке.

⇨ Эффект Бецольда — Брюкке выражается в сдвиге цветового тона при изменении фотометрической яркости монохроматического стимула.

Экспериментальные результаты по изучению эффекта Бецольда — Брюкке опубликованы Парди (1931). Некоторые из них показаны на рис. 6.5: данные указывают на изменение в длине волны, необходимое для сохранения постоянства восприятия цветового тона при десятикратном падении яркости стимула. К примеру, для получения соответствия по цветовому тону при данной яркости стимула на длине волны в 650 нм, при десятикратно меньшей яркости потребуется стимул с длиной волны 620 нм (сдвиг: –30 нм). Напомним, что монохроматический свет независимо от уровня фотометрической яркости стимула всегда имеет одни и те же трехстимульные значения (в трехстимульной колориметрии уровень фотометрической яркости обычно не принимается во внимание). Таким образом, трехстимульные значения указывают на то, что цвет монохроматического излучения якобы одинаков на всех уровнях яркости. Данные Парди опровергают этот тезис и говорят о необходимости учета абсолютного уровня яркости стимула в прогнозировании цветового восприятия.

Эффект Бецольда — Брюкке свидетельствует о том, что с момента абсорбции

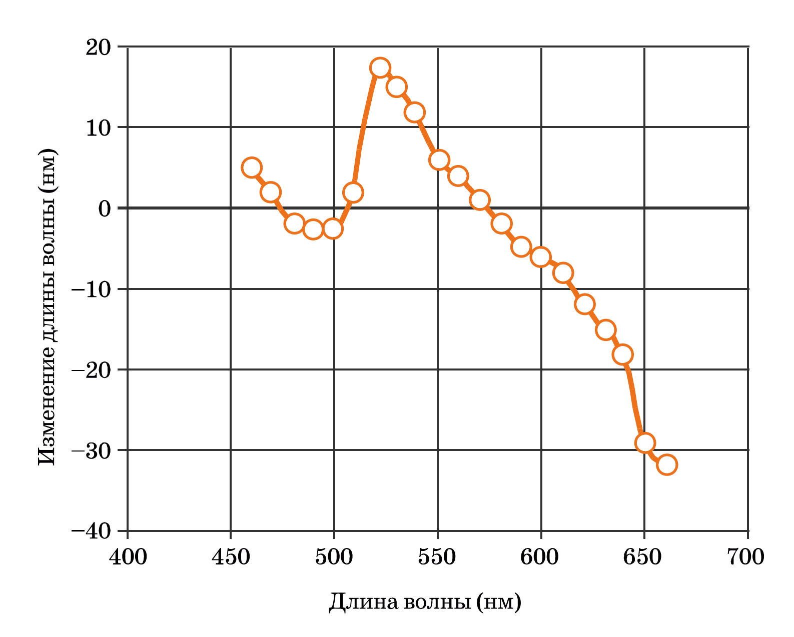


Рис. 6.5 Данные, иллюстрирующие цветовой сдвиг Бецольда — Брюкке. Кривая демонстрирует сдвиг длины волны, требуемый для обеспечения постоянства цветового тона при десятикратном уменьшении светимости стимула.

световой энергии колбочками в зрительной системе человека начинаются нелинейные процессы, которые заканчиваются до того, как вынесено окончательное суждение о цветовом тоне стимула.

Хант (1989) показал, что эффект Бецольда — Брюкке не возникает в случае неизолированных стимулов.

6.4 ЭФФЕКТ ЭБНЕЯ
(ЗАВИСИМОСТЬ ЦВЕТОВОГО ТОНА ОТ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОЙ ЧИСТОТЫ)

Если белый свет смешивать в разных пропорциях с монохроматическим светом определенной длины волны, то смесь будет менять свою колориметрическую чистоту, сохраняя при этом постоянство доминирующей длины волны. Легко догадаться, что набор таких смесей будет лежать на прямой линии между белой точкой и позицией монохроматического стимула на локусе диаграммы цветностей; при этом цветовой тон набора смесей будет оставаться постоянным.

Однако, как показывает эффект Бецольда — Брюкке, длина волны монохроматического излучения — это плохой физический идентификатор восприятия цветового тона: смеси монохроматического излучения с белым светом не держат цветовой тон, что известно как *эффект Эбнея*.

Эффект Эбнея можно проиллюстрировать путем вычерчивания линий постоянного цветового тона для смесей монохроматических стимулов с белыми стимулами. Результаты Робертсона (1970), также изучавшего данный феномен, показаны на рис. 6.6: шесть линий с постоянным цветовым тоном получены им на основе психофизических экспериментов, проведенных с тремя наблюдателями. Отметим, что наблюдаемое нами искривление линий постоянного цветового тона на диаграмме цветностей возникает и в отношении других

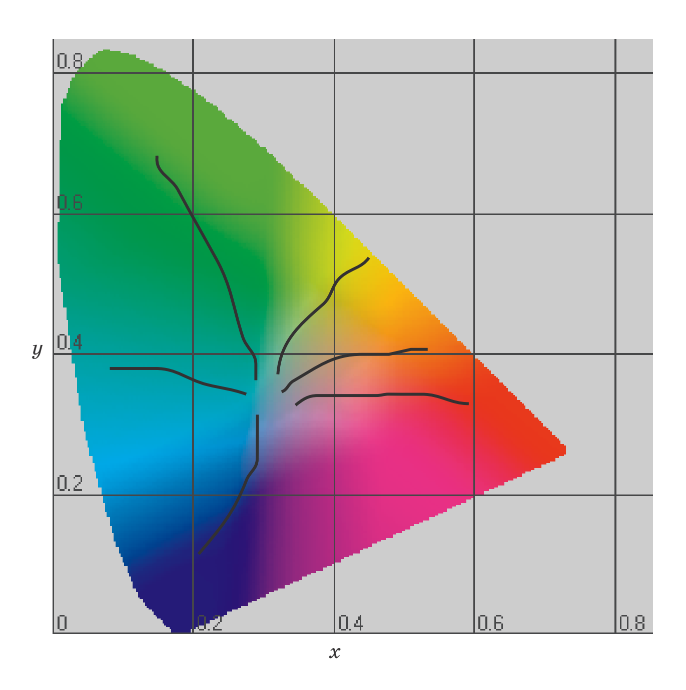


Рис. 6.6 Контуры постоянного цветового тона на диаграмме цветностей CIE 1931, иллюстрирующие эффект Эбнея.

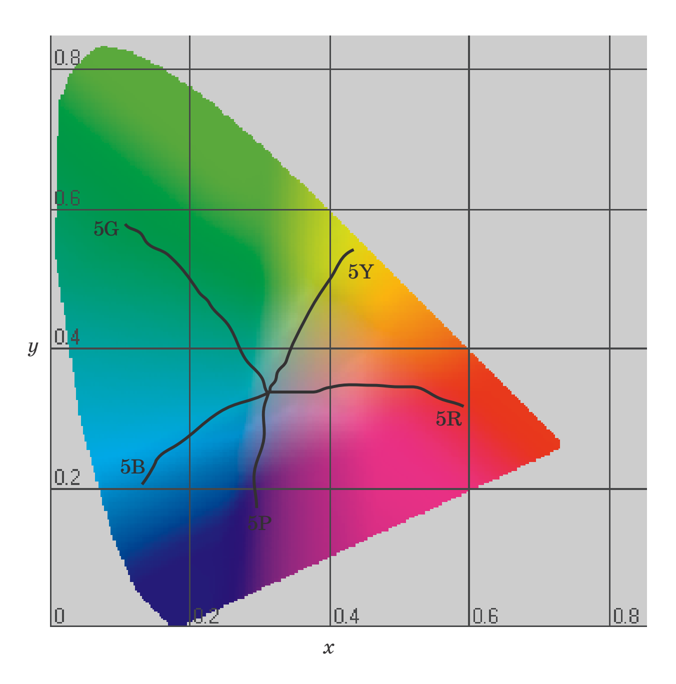


Рис. 6.7 Контуры постоянного манселловского цветового тона со светлотой 5 на диаграмме цветностей CIE 1931.

стимулов. Сказанное можно проиллюстрировать на примере неизолированных цветовых стимулов с помощью линий постоянного манселловского цветового тона (рис. 6.7), полученных при переразметке манселловского атласа в 1940 г. (Ньюхолл, 1940).

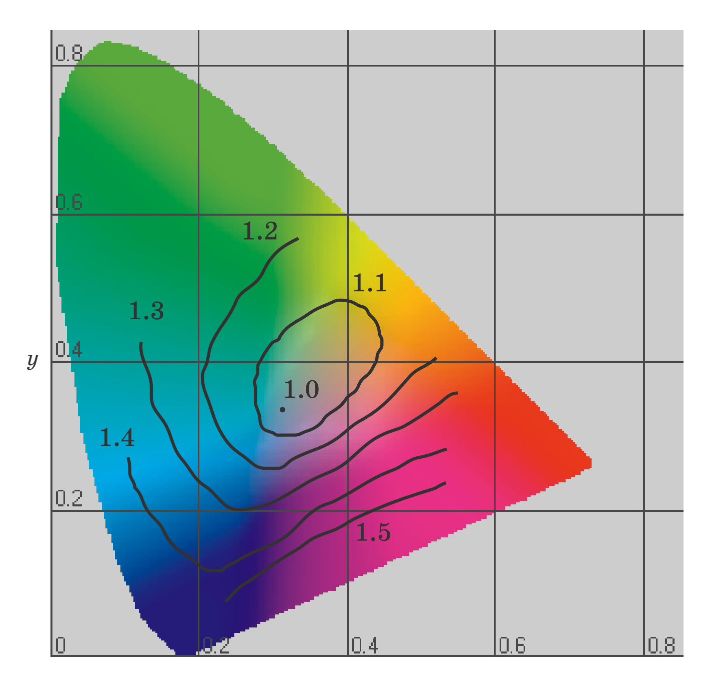


Рис. 6.8 Контуры постоянного отношения субъективная яркость/фотометрическая яркость, иллюстрирующая эффект Гельмгольца — Кольрауша.

Итак,

⇨ Эффект Эбнея проявляет себя тем, что прямые линии, радиально расходящиеся из белой точки диаграммы цветностей, не являются линиями постоянного цветового тона.

Аналогично эффекту Бецольда — Брюкке, эффект Эбнея указывает на нелинейность работы зрительной системы человека на участке между колбочковым возбуждением и восприятием цветового тона (Парди, 1931).

Экспериментальные данные по эффектам Бецольда — Брюкке и Эбнея можно найти у Айямы (1987).

6.5 ЭФФЕКТ ГЕЛЬМГОЛЬЦА — КОЛЬРАУША (ЗАВИСИМОСТЬ СУБЪЕКТИВНОЙ ЯРКОСТИ ОТ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ И ЦВЕТНОСТИ)

В системе CIE-колориметрии трехстимульное значение Y определяет фотометрическую яркость стимула (или коэффициент его яркости). Смысл величины Y состоит в том, чтобы описывать зрительную эффективность стимулов с различными длинами волн в контексте субъективной яркости (порой ошибочно полагают, что, величина Y непосредственно описывает степень субъективной яркости стимула).

Один из феноменов, подтверждающий ошибочность такого мнения, носит название эффекта *Гельмгольца — Кольрауша*. Последний великолепно иллюстрируется вычерчиванием контуров постоянного отношения «субъективная

яркость/фотометрическая яркость» (рис. 6.8 — упрощенная иллюстрация Вышецкого и Стайлса, 1982): контуры представляют собой локусы цветности стимулов с постоянной субъективной яркостью при постоянной фотометрической яркости. Субъективная яркость стимулов (с данными цветностями относительно белой точки и при постоянной фотометрической яркости) отмечена цифрами. Предлагаемые контуры иллюстрируют то, что с повышением чистоты цвета стимула (и при условии его постоянной фотометрической яркости) ощущение субъективной яркости растет. Плюс к тому, мы видим, что эффект зависит от цветового тона стимулов.

Смоделировать эффект Гельмгольца — Кольрауша пытались разными способами, и один из них — формулы Кована и Варэ (Хант, 1991), основанные на расчете некоего поправочного F-коэффициента, зависящего от цветности стимулов (формула 6.1):

$$F = 0.256 - 0.184y - 2.527xy + 4.656x^3y + 4.657xy^4 \tag{6.1}$$

Поправочные коэффициенты вычислены для всех возможных стимулов. Два стимула считаются равносветлыми, пока сохраняется равенство в формуле 6.2:

$$\mathrm{Log}(L_1) + F_1 = \mathrm{Log}(L_2) + F_2 \tag{6.2}$$

где L — фотометрическая яркость стимулов, а F — поправочный коэффициент из уравнения 6.3.

Уравнения Кована и Варэ получены для изолированных стимулов, однако дальнейшие визуальные эксперименты показали, что эффект Гельмгольца — Кольрауша распространяется и на неизолированные стимулы. Фершильд и Пиротта (1991) предлагают обзор научного исследования Кована и Варэ и результирующую простую формулу прогноза светлоты, в которой коррекция CIELAB-светлоты (L^*-предиктор) дается как функция от CIELAB-насыщенности (C^*_{ab}) и угла цветового тона (h_{ab}), а предиктор «хроматической светлоты» L^{**} рассчитывается по формуле 6.3:

$$L^{**} = L^* + f_2(L^*)f_1(h_{ab})C^*_{ab} \tag{6.3}$$

Уравнение 6.3 описывает эффект Гельмгольца — Кольрауша за счет управления предиктором светлоты L^* (основанным на фотометрической яркости стимула) с добавленным коэффициентом насыщенности (C^*_{ab}), т.е. эффект Гельмгольца — Кольрауша зависит от светлоты и цветового тона стимула (подробнее см. Фершильд и Пиротта, 1991).

Эффект Гельмгольца — Кольрауша можно наблюдать при рассматривании образцов манселловского атласа цветов, где образцы с постоянной манселловской светлотой подобраны так, что имеют постоянный коэффициент яркости, то есть: если взять манселловские образцы с данным цветовым тоном и данной светлотой — коэффициент яркости будет постоянным при меняющейся насы-

щенности. Рассматривание такого набора покажет, что образцы с высокой насыщенностью действительно воспринимаются более яркими, и величина этого эффекта зависит от специфики цветового тона и степени светлоты стимула.

⇨ Эффект Гельмгольца — Кольрауша выражается в том, что по мере роста хроматичности стимула (при постоянной фотометрической яркости) растет его субъективная яркость; и, таким образом, субъективную яркость (и, следовательно, светлоту) нельзя рассматривать как одномерную функцию от яркости стимула (или от его относительной фотометрической яркости).

Отличия между спектральной световой эффективностью, измеренной при помощи фликкерной фотометрии (подобно $V(\lambda)$-кривой), и гетерохроматическим соответствием по яркости (эффект Гельмгольца — Кольрауша), а также их зависимость от возраста наблюдателя — описаны Крафтом и Вернером (1994).

6.6 ЭФФЕКТ ХАНТА
(ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛНОТЫ ЦВЕТА ОТ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ)

Внимательное наблюдение за окружающим миром ведет нас к пониманию того, что цветовое восприятие объектов существенно меняется, когда меняется полный уровень фотометрической яркости стимулов: объекты кажутся красочными и контрастными солнечным летним днем и приглушенными в сумерках (эффекты Ханта и Стивенса [раздел 6.7]).

Эффект Ханта был выявлен в процессе исследования феноменов световой и темновой адаптаций цветового зрения (Хант, 1952). Хант обобщил данные по согласованным цветовым стимулам, полученные через т.н. гаплоскопическое соответствие: левый и правый глаза наблюдателя были адаптированы к разным просмотровым условиям, и соответствия были получены между стимулами, по отдельности предъявляемыми левому и правому глазам.

Рис. 6.9 схематично иллюстрирует хантовские результаты: точечные данные представляют результат визуального согласования стимулов при различных уровнях адаптации. При этом видно, что стимулу с низкой колориметрической чистотой при высокой яркости (10000 cd/m^2) будет соответствовать[1] стимул низкой яркости (1 cd/m^2), но с высокой колориметрической чистотой. Таким образом было достоверно установлено, что при повышении яркости хроматического стимула усиливается ощущение полноты его цвета.

Эффект Ханта может быть проиллюстрирован рис. 4.1: представьте себе, что вы находитесь в тех же условиях освещения, что и кубики рисунка, — обратите внимание на то, что более освещенные стороны кубиков воспринимаются более полноцветными.

Эффект Ханта можно наблюдать, рассматривая цветное изображение (скажем, все тот же рис. 4.1) при разных уровнях освещенности: при низком уровне

[1] По полноте цвета. — *Прим. пер.*

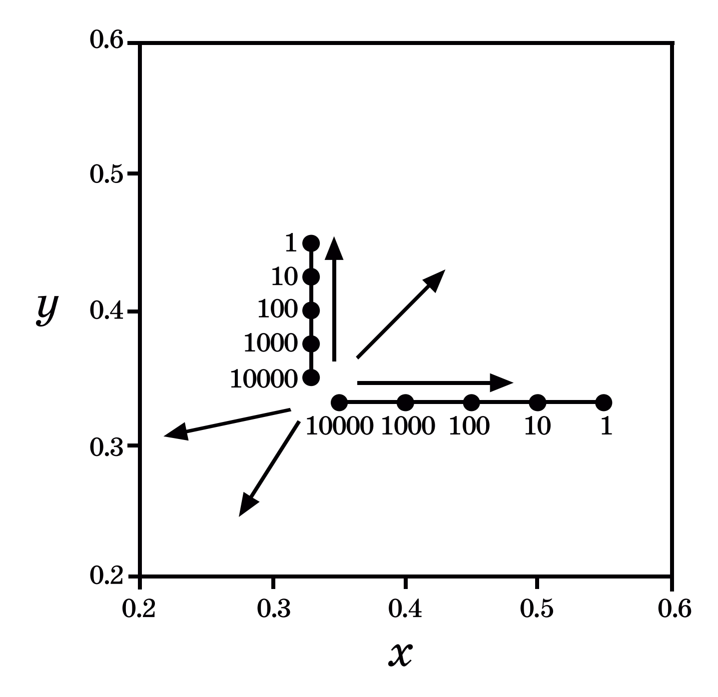


Рис. 6.9 Векторы изменения цветностей при изменении уровня светимости, иллюстрирующие эффект Ханта. Точками отмечены уровни светимости стимулов.

освещенности полнота цвета различных элементов изображения будет совсем небольшой, но если затем вынести это изображение на яркий свет (например, выйти с ним в солнечный день на улицу или поместить в просмотровую кабину) — элементы изображения будут восприниматься с существенно большей полнотой цвета.

⇨ Эффект Ханта выражается в том, что ощущение полноты цвета хроматического стимула растет по мере роста его фотометрической яркости.

Эффект Ханта указывает также на необходимость учета абсолютного уровня яркости стимула в моделях цветового восприятия (чего традиционная колориметрия обеспечить не в состоянии).

6.7 ЭФФЕКТ СТИВЕНСА (ЗАВИСИМОСТЬ КОНТРАСТА ОТ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ)

Эффект Стивенса тесно связан с эффектом Ханта. Если эффект Ханта — это повышение хроматического контраста между стимулами за счет увеличения их полноты цвета по мере роста их фотометрической яркости, то эффект Стивенса — это рост субъективно-яркостного (или светлотного) контраста по мере роста яркости стимулов. Для лучшего понимания эффекта Стивенса отметим, что здесь о контрасте мы говорим как о кратности изменения субъективной яркости (или светлоты) в результате изменения фотометрической яркости (подробнее по вопросам контраста см. у Фершильда [1995]).

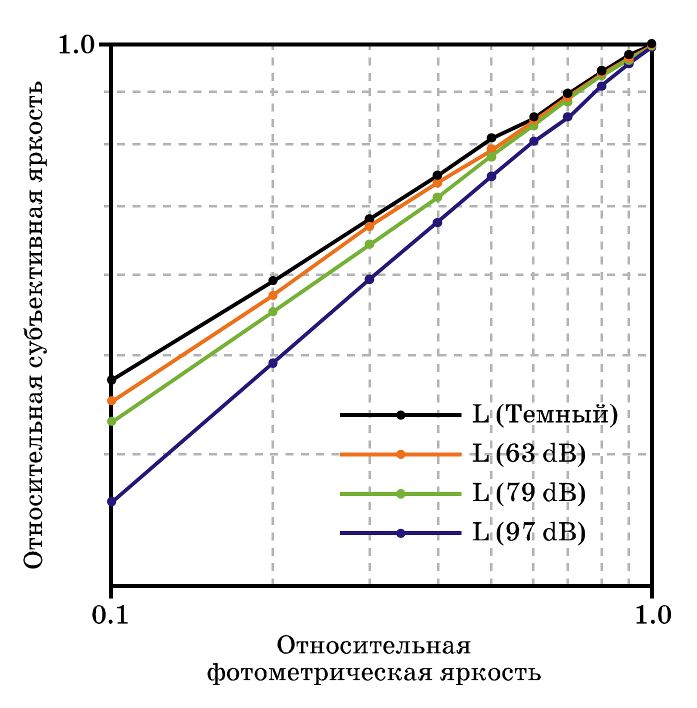


Рис. 6.10 Изменения в светлотном контрасте как функция от адаптирующей яркости, согласно эффекту Стивенса.

Подобно хантовскому эффекту, эффект Стивенса был обнаружен в результате классических психофизических экспериментов (Стивенс и Стивенс, 1963), при которых наблюдателей просили установить величину субъективной яркости стимулов в различных условиях адаптации. Результаты экспериментов продемонстрировали степенную зависимость между субъективной яркостью и измеренной яркостью стимулов (данную зависимость в психофизике часто именуют степенным законом Стивенса). График данной зависимости будет степенным в линейных координатах, но превращается в прямую линию в координатах логарифмических (наклон прямой равен степени функции).

Набор типичных графиков с логарифмическими осями, полученный в экспериментах Стивенса и Стивенса (1963), показан на рис. 6.10: линии демонстрируют усредненные относительные величины субъективной яркости как функцию от относительной яркости стимула (при четырех различных уровнях адаптации наблюдателя). По графикам видно, что наклон прямых (соответственно и степень функции) растет по мере роста адаптирующей яркости стимула.

⇨ Эффект Стивенса выражается в том, что по мере роста фотометрической яркости (сложных стимулов. — *Прим. пер.*) темные стимулы воспринимаются еще более темными, а светлые — еще более светлыми.

На первый взгляд, результаты противоречивы, но на самом деле таковы.

Эффект Стивенса можно наблюдать при показе одного и того же изображения при низком и высоком уровнях фотометрической яркости. Особенно наглядным явится черно-белое изображение: при низком уровне яркости оно бу-

дет выглядеть весьма низкоконтрастным — «белые» области не будут восприниматься очень яркими и, что совсем удивительно, — темные области не будут казаться очень темными; если затем это же изображение вынести на яркий свет, то «белые» области будут восприниматься существенно более яркими, а темные — существенно более темными, — то есть визуальный контраст изображения вырастет.

6.8 ЭФФЕКТ ХЕЛЬСОНА — ДЖАДДА (ЦВЕТОВОЙ ТОН НЕМАРКИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ)

Эффект Хельсона — Джадда трудновоспроизводим в нормальных условиях просмотра, поэтому малозначим в практике. Однако его описание включено в нашу книгу, поскольку две модели цветового восприятия (модель Ханта и модель Наятани) успешно прогнозируют данный эффект. При использовании указанных моделей важно понимать определение эффекта Хельсона — Джадда и учитывать его.

Экспериментальные данные, благодаря которым впервые был описан данный эффект, получены Хельсоном в 1938 г. В его эксперименте наблюдателей помещали в световую кабину (наподобие туалетной комнаты), освещенную светом, близким к монохроматическому. После некоторого периода привыкания наблюдателей просили присвоить манселловское значение различным немаркированным образцам (ахроматичные манселловские патчи). Типичные результаты при манселловской светлоте фона 5/ показаны на рис. 6.11 (при этом сходные результаты наблюдались на черно-белых фонах).

Рис. 6.11 демонстрирует насыщенность (в манселловских единицах) немаркированных образцов на различных уровнях манселловской светлоты: мы видим, что под строго хроматичным освещением образцы не воспринимаются нейтральными. Образцы, которые были светлее фона, демонстрировали некие величины насыщенности при цветовом тоне, сходном с цветовым тоном источника, тогда как образцы, которые были темнее, чем фон, приобретали цветовой тон, дополнительный к тону источника.

Важно отметить, что данный эффект возникает только при освещении, близком к монохроматическому, и, как установил Хельсон, этот эффект полностью пропадает, когда к монохроматическому свету добавляют буквально 5% белого. Поскольку цветовые стимулы никогда не оценивают при монохроматическом освещении, практическое значение эффекта Хельсона — Джадда крайне невелико, но все же он был учтен в некоторых моделях цветового восприятия.

Мори с коллегами наблюдали эффект Хельсона — Джадда в одном из недавних экспериментов (Мори и др., 1991). Они поставили гаплоскопический опыт (левый и правый глаза адаптированы по отдельности), который увеличил вероятность возникновения эффекта Хельсона — Джадда. Известно, что данный эффект невозможно продемонстрировать (или наблюдать) при нормальных условиях просмотра. Последнее ставит под сомнение ценность оригинального хельсоновского исследования, но при этом все равно возникает вопрос: почему же все-таки у Хельсона эффект был столь выраженным? И хотя прямого ответа

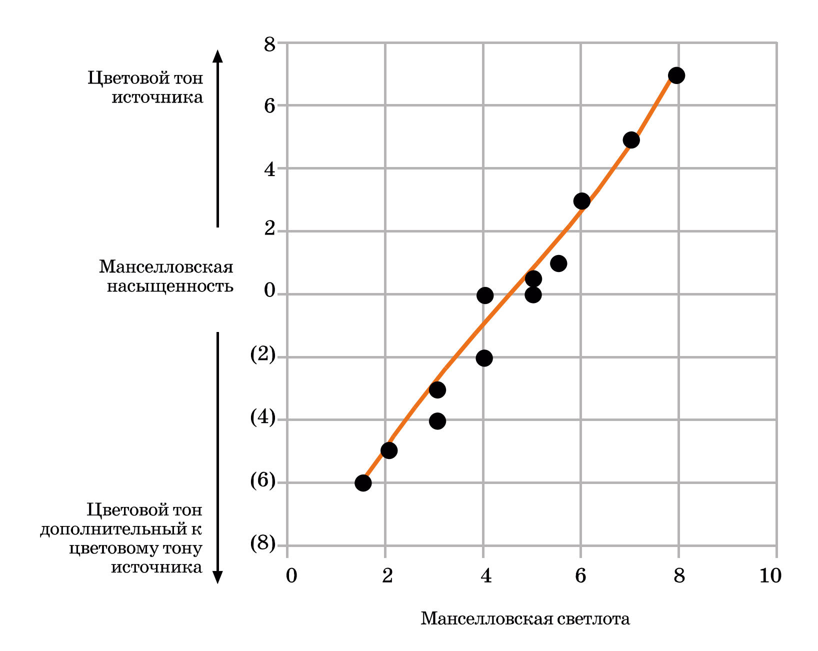


Рис. 6.11 Ряд оригинальных хельсоновских результатов (1938), иллюстрирующих эффект Хельсона — Джадда: значения манселловского цветового тона и насыщенности для немаркированных образцов при зеленом источнике и «сером» фоне.

на этот вопрос нет, тем не менее можно предположить, что причина кроется в неполной хроматической адаптации наблюдателей, объясняющей цветовой тон светлых патчей, и в хроматической индукции, объясняющей цветовой тон темных.

Принято считать, что в обычных просмотровых ситуациях когнитивные механизмы восприятия «обесцвечивают осветитель», благодаря чему сохраняется ахроматичность восприятия немаркированных образцов. Возможно, хельсоновская «монохроматическая будка» и недавние гаплоскопические эксперименты не позволяли когнитивным механизмам работать во всю силу.

Странность хельсоновских результатов еще и в том, что наблюдатели отметили высокую насыщенность образцов (6–8 по манселловской шкале), имевших светлоту меньше 2, — такое восприятие невозможно в принципе, поскольку образец с манселловской светлотой 2 очень близок к черному и не может восприниматься одновременно и темным, и высокохроматичным. Вероятно, наблюдатели столкнулись с т.н. высокохроматичным «отблеском»[1] на темные объекты, имевшим место в данных условиях просмотра, и который можно объяснить симультанным контрастом и неполной адаптацией.

Недавние попытки Манселловской научной лаборатории воспроизвести эффект Хельсона — Джадда выявили одно уникальное свойство восприятия: эффект Хельсона — Джадда не наблюдается в случае сложных стимулов, но заметен тогда, когда отдельные немаркированные патчи рассматриваются на равномерном фоне (даже два соседних стимула от двух немаркированных образ-

[1] В оригинале «glowing light», взятый в кавычки. — *Прим. пер.*

цов, отличающихся друг от друга на один шаг по отражательной способности, уже слишком сложны для возникновения данного эффекта).

К тому же, согласно Хельсону, необходим свет, близкий к монохроматическому. В таких условиях наблюдатели действительно говорят о хроматическом «отблеске» на те образцы, которые темнее фона, и появлении у них цветового тона, дополнительного к тону осветителя. Любопытно, что в данном эксперименте только 50% испытуемых сообщили, что вообще наблюдали какие-либо эффекты.

Несмотря на то, что прикладная ценность эффекта Хельсона — Джадда весьма спорна, все-таки он поднимает ряд интересных научных вопросов и наводит на серьезные размышления, так как влияет на результаты прогнозов, выполняемых некоторыми моделями цветового восприятия.

Итак,

⇨ Эффект Хельсона — Джадда выражается в том, что немаркированные образцы, рассматриваемые при высокохроматичном освещении, приобретают цветовой тон источника освещения, если они светлее, чем фон, и дополнительный цветовой тон, если они темнее фона.

6.9 ЭФФЕКТ БАРТЛЕСОНА — БРЕНЕМАНА (ЗАВИСИМОСТЬ КОНТРАСТА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТ ОКРУЖЕНИЯ)

Примерно в то же самое время, когда Стивенсы (1963) занимались исследованием визуального контраста (растущего по мере повышения уровня фотометрической яркости), Бартлесон и Бренеман (1967) интересовались визуальным контрастом при восприятии сложных стимулов (то есть — изображений), в частности, зависимостью от разных уровней яркости и вариаций окружения. Исследователи зафиксировали результаты, сходные с эффектом Стивенса (зависимость визуального контраста от уровня фотометрической яркости), к тому же, они получили ряд дополнительных интересных данных, свидетельствующих о зависимости визуального контраста от относительной яркости окружения изображения.

Экспериментальные данные, полученные Бартлесоном и Бренеманом через установку соответствий и последующее шкалирование результатов, показали, что визуальный контраст изображений растет по мере перехода окружения от темного, через среднее, к светлому. Данный эффект возникает потому, что темное окружение заставляет темные области изображения казаться светлее, в то время как влияние окружения на светлые области незначительно (белые участки остаются белыми несмотря на изменения в окружении). Таким образом, поскольку в темных областях изображения визуальные изменения больше, нежели в светлых, на выходе имеем изменения в визуальном контрасте.

Результаты Бартлесона и Бренемана хорошо согласуются с давно известными требованиями к тональному репродуцированию изображений: фотографические отпечатки, рассматриваемые на средне-сером фоне, один в один передают соотношения относительных яркостей стимулов оригинальной сцены. Слайды, предназначенные для проекционного показа в темном окружении, из-

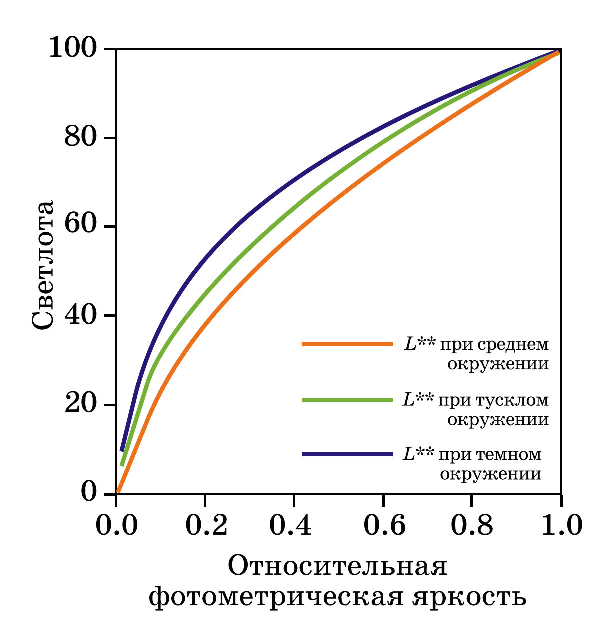


Рис. 6.12 Изменения в светлотном контрасте как функция от относительной фотометрической яркости окружения (согласно данным Бартлесона и Бренемана [Бартлесон, 1975]).

готавливаются так, что их трансферная функция близка к степенной с коэффициентом примерно 1.5 (или, как говорят: гамма всей фотографической системы примерно равна 1.5), то есть диапозитивы имеют высокий физический контраст, дабы противодействовать редукции визуального контраста, обусловленной темным окружением. То же касается и телевизионных изображений, обычно рассматриваемых в тусклом окружении: их воспроизводят с использованием степенной функции с коэффициентом 1.25 (гамма телевизионной системы равна 1.25).

Подробнее о необходимости компенсации влияния окружения в репродуцировании изображений (и в целом об истории этого вопроса) см. у Ханта (1995) и Фершильда (1995).

В 1967 г. Бартлесон и Бренеман опубликовали уравнения, весьма удачно прогнозирующие экспериментальные результаты; а в статье, посвященной оптимизации тоновых репродукций, Бартлесон (1975) дал набор простых уравнений, имевших большое практическое значение.

На рис. 6.12 показаны предикторы светлоты (как функции от относительной яркости в различных условиях окружения), согласующиеся с результатами Бартлесона и Бренемана. Данный график математически идентичен данным Стивенсов (рис. 6.10): прямые линии с разными углами наклона к логарифмическим осям можно пересчитать в степенные функции по линейным осям и получить кривые, сходные с кривыми Бартлесона и Бренемана (рис. 6.12).

Модели цветового восприятия, такие, как модель Ханта, RLAB и ряд CIE-моделей, включают в себя предикторы влияния окружения на визуальный контраст изображений.

Очень часто пользователи графических компьютеров выключают в помещении свет, дабы CRT-дисплей воспринимался более контрастным. В результате

окружение становится темным, что, согласно Бартлесону и Бренеману, должно, напротив, привести к падению контраста изображений на экране, но мы видим, что прогнозы ученых противоречат нашему повседневному опыту. Однако же причина происходящего в том, что источники освещения в рабочей комнате обычно дают паразитные рефлексы на экран дисплея, понижающие физический контраст изображения, и если окружение дисплея удается осветить без рефлексов на поверхность монитора (к примеру, за счет расположения источников света позади монитора), то визуальный контраст изображения на экране оказывается большим, нежели в темном помещении.

6.10 КОГНИТИВНОЕ ОБЕСЦВЕЧИВАНИЕ ОСВЕТИТЕЛЯ

Механизмы хроматической адаптации можно разделить на сенсорные и когнитивные. Хантом и Винтером (1975), а также Фершильдом (1992, 1993) четко установлено, что сенсорные механизмы не в состоянии обеспечить хроматическую адаптацию в полном объеме, однако в типичных условиях просмотра наблюдатели воспринимают окрашенные объекты так, как будто адаптация по осветителю того или иного цвета прошла полностью (к примеру, белый объект воспринимается белым при свете лампы накаливания, флуоресцентном свете или дневном). Поскольку, как было сказано выше, сенсорные механизмы неспособны обеспечить такое восприятие, мы говорим, что процесс хроматической адаптации завершают т.н. когнитивные механизмы, основанные на знании объектов, освещении и условиях просмотра в целом (подробности см. в гл. 8).

«Обесцвечивание осветителя» относится к когнитивной интерпретации наблюдателями цветовых стимулов, определяемой особенностями освещения, что в конечном итоге позволяет воспринимать цветовые стимулы объектов независимо от изменений в освещении (и что в целом вполне совместимо с бытовым утверждением, будто цвет так или иначе «привязан» к объекту). Суть эффекта когнитивного обесцвечивания осветителя важно понять, и иметь в виду то, что этот эффект учтен в ряде моделей цветового восприятия (к примеру, в модели Ханта, RLAB-модели и пр.).

Учет эффекта когнитивного обесцвечивания осветителя полезен в работе с изображениями, к примеру, при сравнении изображений, выполненных на разных носителях: при рассматривании отпечатков наблюдатели способны подстраиваться под цвет осветителя, однако же, когда они смотрят на экран монитора, в их поле зрения нет освещенных объектов, и эффекта когнитивного обесцвечивания осветителя не возникает. Таким образом, в некоторых ситуациях бывает необходимо смоделировать изменения в режиме просмотра.

Имеется ряд важных исследований, выполненных совсем недавно и посвященных изменениям в цветовом восприятии, индуцированным сложностимульными структурами и наблюдательской интерпретацией. Описание экспериментов можно найти у Гилхриста (1980), Аренда и Ривса (1986), Аренда и Гольдштайна (1987, 1990), Ширилло (1990), Аренда (1991, 1993), Ширилло и Шевелла (1993, 1996), Ширилло и Аренда (1995), Корнелиссена и Бреннера (1995).

Работы Гравена и Фостера (1992), а также Спайгле и Брайнарда (1996) по-

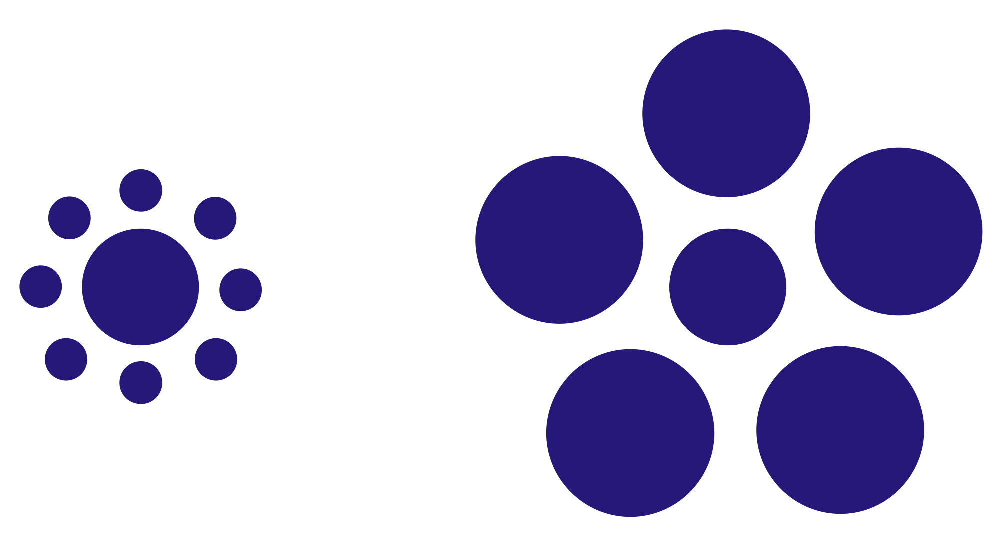


Рис. 6.13 Пример пространственного симультанного контраста: центральные круги физически одинакового диаметра.

священы способности наблюдателей выявлять отличия в освещении отдельно от отличий в цвете объектов.

Лотто и Пурвс (2002), а также Пурвс с коллегами (2002) объединили множество концепций, создав изящную эмпирическую теорию цветового восприятия.

6.11 ПРОЧИЕ КОНТЕКСТНЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Диапазон эффектов цветового восприятия, зависящих от структуры и/или контекста стимулов, очень широк: некоторые из них относятся к категории оптических иллюзий, другие представляют интерес для традиционной колориметрии (а порой, и для моделей цветового восприятия).

Оптических иллюзий великое множество, и почти каждая серьезная публикация, посвященная цвету или зрению в целом, обязательно включает в себя хотя бы частичное их описание, к примеру: Ванделл (1995), Барлоу и Моллон (1982), Гурвич (1981) и др., поэтому нет смысла повторяться. Мы лишь приведем ряд примеров, иллюстрирующих важность контекстных и структурных эффектов в цветовом восприятии.

Рис. 6.13 демонстрирует возникновение структурной иллюзии, которая имеет мало общего с цветом, но подчеркивает важность окружения стимула: оба центральных круга имеют одинаковый диаметр, однако тот, что окружен большими кругами, воспринимается как круг с меньшим диаметром. Данный эффект не относится к цветовой проблематике непосредственно, но, тем не менее, он демонстрирует влияние на восприятие пространственных вариаций стимулов, а также несомненную функциональную связь между восприятием пространственным и восприятием цветовым.

Различные эффекты прозрачности помогают убедиться в наличии взаимосвязи между пространственным и хроматическим восприятиями. Один из примеров предлагает Адельсон (1993): на рис. 6.14 (а) показаны два ряда одинако-

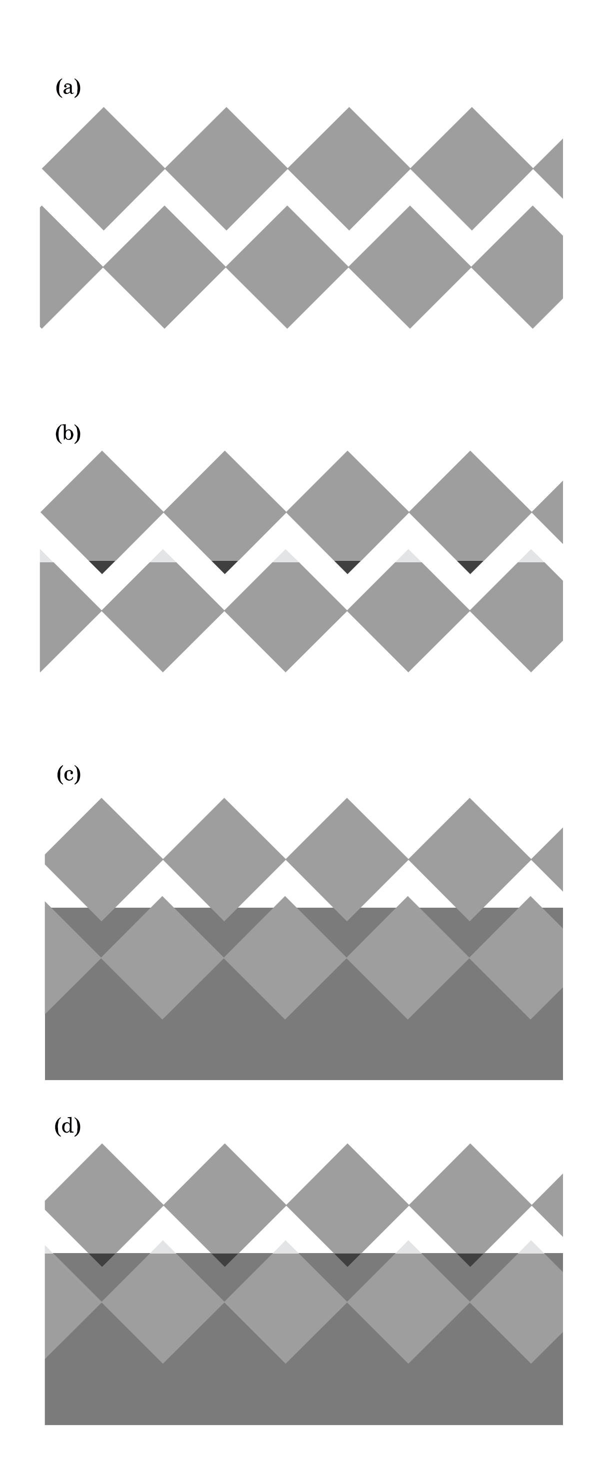


Рис. 6.14 Эффект визуального контраста, зависящий от когнитивной интерпретации пространственной структуры стимулов: (a) — два ряда одинаковых серых ромбов; (b) — те же ромбы с измененными уголками, что лишь слегка влияет на восприятие фигур; (c) — те же ромбы, но с небольшим нахлестом на разные фоны, отличие по восприятию опять же минимально; (d) — комбинация уголков и фонов на тех же ромбах: резкое изменение восприятия — ромбы нижнего ряда интерпретируются как светлые объекты, которые частично затенены (или находятся позади некоего фильтра).

вых серых ромбов; на рис. 6.14 (b) к ромбам сделана небольшая добавка из разнотонных уголков: мы видим, что уголки не оказывают никакого (или почти никакого) влияния на восприятие ромбов; на рис. 6.14 (c) те же ромбы частично посажены на различные фоны, но поскольку каждый ромб слегка «наползает» на соседний фон, то разница в восприятии рядов по-прежнему минимальна; однако на рис. 6.14 (d), где ромбы с разнотонными уголками посажены на разнотонные фоны, — налицо явное перцепционное отличие одного ряда ромбов от другого, которое когнитивно интерпретируется как эффект прозрачности (называемый также теневым эффектом).

Такую же демонстрацию можно устроить и в цвете с использованием, к примеру, желтого и синего фонов и уголков. Тогда мы сможем убедиться в том, что на общее восприятие влияет не только пространственное расположение стимулов, но и их когнитивная интерпретация.

Дополнительные психофизические данные, касающиеся пространственной структуры стимулов и их восприятия, можно найти у Логвиненко и Меньшиковой (1994), а также Тайя и коллег (1995). В недавней работе Де-Веерда (1998), обсуждаются различные перцепционные эффекты «заливки», которые, правда, не имеют непосредственного отношения к нашей теме.

Влияние структурных эффектов на цветовое восприятие подтверждает Шевелл (1993): в его экспериментах к окружениям цветовых стимулов добавлялись простые пространственные структуры. Ученым были получены мощные эффекты, которые невозможно объяснить известными теориями симультанного контраста и адаптации. Результаты, полученные Шевеллом, свидетельствуют о необходимости синхронного учета пространственных и цветовых вариаций стимулов — учета именно в их неразрывной связи друг с другом, но никак не по отдельности.

Сегодня модели цветового восприятия учитывают пространственные вариации стимулов весьма примитивным образом, поэтому есть настоятельная необходимость дальнейшего углубленного исследования данного вопроса, в частности, по направлениям, предложенным Пойрсоном и Ванделлом (1993).

Прочие интересные цветовые эффекты во многом основаны на когнитивной интерпретации структуры и контекста стимулов. Классические эксперименты с т.н. памятными цветами, описанные в большинстве учебников по физиологии восприятия и ощущений, тому яркий пример.

Идея памятных цветов состоит в том, что наблюдатели помнят некие цветовые прототипы хорошо знакомых объектов: в деле репродуцирования изображений часто упоминаются небо, кожа, листва (Хант, 1995; Бартлесон, 1960; Хант и др., 1974).

Существуют простые и легко воспроизводимые эксперименты, при которых, к примеру, две фигуры, по форме напоминающие соответственно помидор и банан, выполняют из одной и той же оранжевой бумаги, а наблюдателей при этом просят прошкалировать цветовое ощущение от каждого объекта. Муляж банана, как правило, воспринимается слегка желтее, нежели муляж помидора (последний будет восприниматься чуть более красным). Описанные эффекты

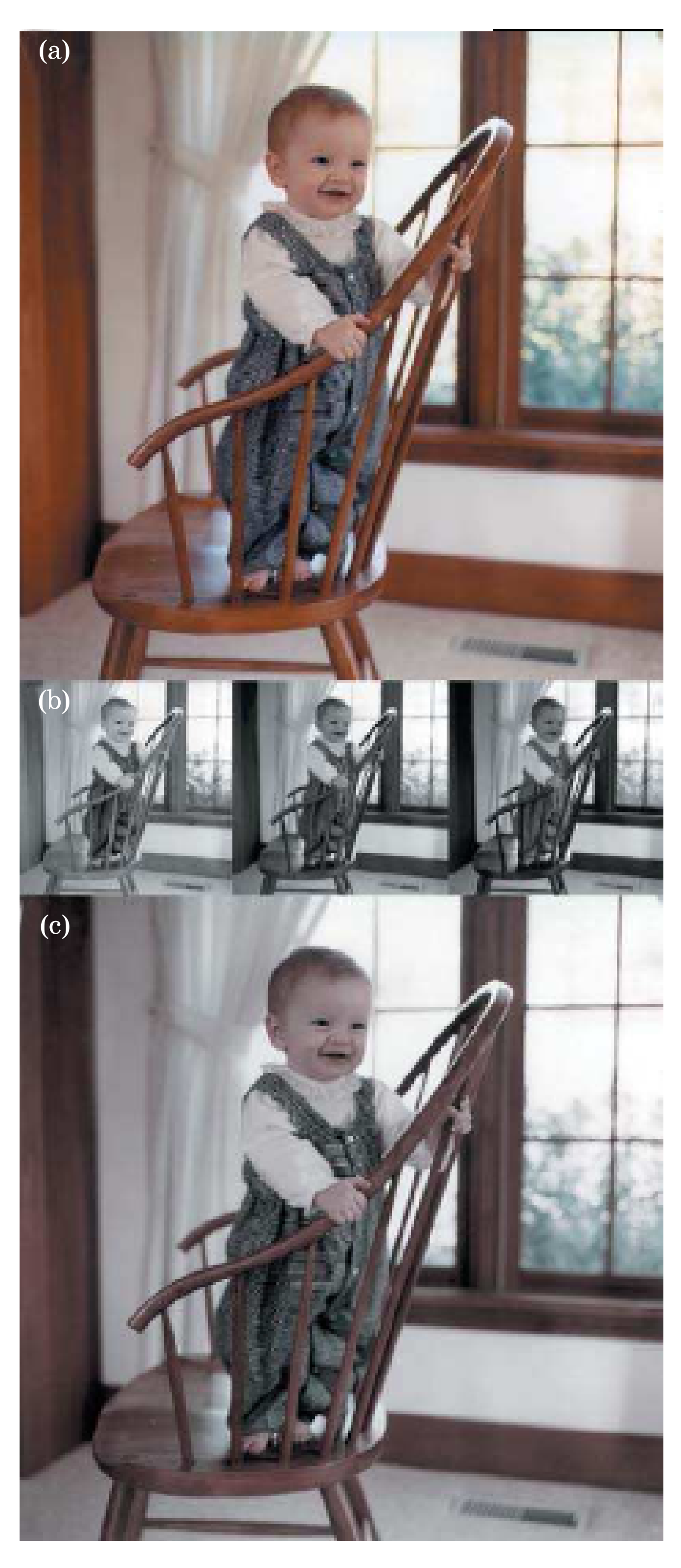


Рис. 6.15 Пример двухцветной репродукции изображения: (a) — полноцветный оригинал; (b) — красная, зеленая и синяя сепарации изображения; (c) — комбинация красной сепарации, «проектированной» через красный фильтр, с зеленой сепарацией, «проектированной» с помощью белого света.

слабы, но весьма устойчивы и лишний раз свидетельствуют о важности наблюдательской интерпретации стимулов.

Дополнительные экспериментальные данные, характеризующие цветовую память, дают Нильсон и Нельсен (1981), а также Джин и Шевелл (1996).

Двухцветные проекции

Некоторое отношение к памятным цветам имеют знаменитые двухцветные проекции Лэнда (1959), которые включают в себя полный диапазон цветовых ощущений, якобы воспроизводимых вопреки традиционной трехстимульной колориметрической теории.

На рис. 6.15 показан результат лэндовской двухцветной проекции: оригинальное цветное изображение (рис. 6.15 [a]) в соответствии с максвелловским принципом цветного фотографического процесса (Максвелл, 1858–62) разделено на три черно-белых позитива (рис. 6.15 [b]), представляющих информацию красного, зеленого и синего каналов. Как правило, позитивы проектируются через красный, зеленый и синий фильтры соответственно и при наложении друг на друга дают высококачественную репродукцию оригинального изображения (рис. 6.15 [a]). В лэндовской двухцветной проекции красная сепарация проектируется через красный фильтр, зеленая сепарация освещена обычным белым светом, а синяя — вообще не проектируется (рис. 6.15 [c]).

Как и следовало ожидать, такая проекция в состоянии воспроизвести лишь розоватое изображение, которое хоть и смотрится достаточно полноцветным, выглядит весьма далеким от нормальной трехцветной проекции (с которой Лэнд, по всей видимости, не удосужился выполнить прямого сравнения!).

Качество двухцветной проекции зависит от объекта, поскольку добавка памятных цветов усиливает впечатление. Наблюдаемый эффект восполнения недостающих цветовых ощущений можно легко объяснить симультанным контрастом и хроматической адаптацией (Джадд, 1960; Вальберг и Ланге-Малецкий, 1990).

* * *

Когнитивные аспекты цветового восприятия и цветового различения очень интересны, но по большей части лежат вне контекста данной книги. Интересный материал по данному вопросу можно найти у Давыдова (1991): любопытно, что когнитивная модель, предложенная исследователем, хорошо согласуется с различными интерпретациями цветового восприятия, объясняющими феномены, описанные в нашей книге.

Отметим также, что в когнитивных аспектах цветового восприятия нельзя полностью разобраться без знакомства с классическим трудом Каца (1935) — ученого, обладающего великолепным знанием данной проблемы.

6.12 КОНСТАНТНОСТЬ ЦВЕТА?

Константность цвета — это еще один часто обсуждаемый феномен, который обычно толкуют как очевидную неизменность цветового восприятия объектов

при тех или иных изменениях в освещении. Такое определение вводит нас в некоторое заблуждение, главная причина которого в том, что константности цвета... не существует в самоей человеческой природе! — материалы предыдущих разделов текущей главы и беседа о хроматической адаптации в восьмой главе должны окончательно прояснить данный вопрос.

Мысленно можно поставить интересный эксперимент, указывающий на неоднозначность понятия *константность цвета*: если цвета объектов были бы действительно неизменны, то не было бы необходимости учитывать источник света в колориметрических вычислениях (выполняемых для прогноза цветовых соответствий) и в итоге не было бы нужды в моделях цветового восприятия, поскольку CIE *XYZ*-колориметрия определяла бы это восприятие при всех возможных условиях просмотра. Ясно, что дело обстоит не так, и метамерность объектов подчас донельзя усложняет ситуацию: объекты могут соответствовать друг другу по цвету при одном источнике освещения, но быть совершенно непохожими друг на друга при остальных источниках — то есть, мы говорим, что стимулы метамерной пары не обладают цветовой константностью.

Почему же тогда термин «константность цвета» все-таки существует? Возможно, цитата из Эванса ответит на этот вопрос лучше всего: «...в повседневной жизни мы привыкли считать цвет большинства объектов неизменным благодаря большей склонности человека к запоминанию цветов, нежели к непосредственному цветовому восприятию».

Когда цвет исследуется непосредственно, отсутствие его константности становится самоочевидным: изучение цветового восприятия и создание его моделей фактически ставят целью количественное описание и прогноз *степени отсутствия* константности цвета.

Сравнительно недавние экспериментальные данные, посвященные вопросу константности, представлены в исследованиях Блэквелла и Бушбаума (1988), Фостера и Насцименто (1994), Курики и Учикавы (1996), а также Баумла (1999).

Вместе с тем концепция константности цвета в какой-то степени по-прежнему интересна: во-первых (и это могло бы показаться странным), константности цвета нет в физиологии человека; во-вторых — дальнейшее изучение константности цвета может привести к возникновению теорий, утверждающих, что зрительная система человека стремится лишь к приблизительной цветовой константности, и описывающих ее принципиальные ограничения в реальном мире. Такие теории существуют в сфере т.н. компьютерной цветовой константности, то есть в сфере разработок систем машинного зрения (к примеру, Мэлони и Ванделл, 1986; Дрю и Финлейсон, 1994; Финлейсон и др., 1994).

Джеймсон и Гурвич (1989) описывают некоторые интересные концепции константности цвета, ее физиологическую неполноту, а также биологический смысл этой неполноты. Ученые отмечают ценность комплексных механизмов хроматической адаптации, обеспечивающих требуемую неполноту константности цвета и, следовательно, сохранение информации об освещении. Последнее необходимо для получения важных данных об изменениях в окружающей обстановке, к примеру: погоде, времени суток, характере освещения, а также для получения информации о постоянных физических свойствах объектов сцены.

7 УСЛОВИЯ ПРОСМОТРА

В шестой главе мы обсудили ряд феноменов цветового восприятия, требующих расширения базовой колориметрии до уровня «высшей». Нам стало ясно, что на цветовое восприятие стимулов влияет конфигурация поля зрения. В текущей главе мы дадим описания и практические определения компонентов поля зрения, учет которых необходим для создания и развития дееспособных моделей цветового восприятия. Мы также поговорим о колориметрических измерениях этих компонентов.

Еще раз отметим, что эффективное использование моделей цветового восприятия требует четкого определения и высокоточного измерения компонентов наблюдательского поля зрения, поскольку различия в его конфигурациях ведут к различиям в когнитивной интерпретации стимулов и, как следствие, к вариативности цветового восприятия.

В последней части текущей главы будет дано объяснение явлений, возникающих при разных зрительских интерпретациях стимулов. Понимание сути т.н. *зрительских интерпретаций* (modes of viewing[1]) поможет понять то, почему физически и внешне идентичные стимулы могут вызывать неодинаковые цветовые ощущения.

Различные определения стандартных условий просмотра, предназначенные для различных отраслей промышленности, тесно связаны со спецификацией полей зрения, используемой в моделях цветового восприятия. Стандартизируя условия просмотра, мы пытаемся минимизировать трудности, связанные с прогнозом цветовых ощущений. Примером такой стандартизации может служить ANSI-стандарт на условия просмотра отпечатков и слайдов (1989).[2]

7.1 КОНФИГУРАЦИЯ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ

Цветовое восприятие стимула зависит как от самого стимула, так и от других стимулов, соседствующих с первым в пространстве или во времени. Однако темпоральные (временны́е) эффекты при всей их значимости редко проявляют себя в практике работы с цветом: они не актуальны, когда наблюдатели располагают временем, достаточным для адаптации зрения к условиям наблюдения, а также когда есть гарантия темпоральной неизменности предъявляемых стимулов (разумеется, существует целый ряд недавно появившихся промышленных областей, таких, как цифровое видео, которые рано или поздно приведут нас к углубленному изучению временны́х аспектов цветового восприятия).

Пространственная конфигурация поля зрения всегда остается критически

---

1 Словосочетание «modes of viewing» не имеет русскоязычного эквивалента, поэтому перевод выполнен исходя из сути явления.— *Прим. пер.*

2 А также стандарт ISO 3664:2000 «Условия просмотра — Полиграфия и фотография». — *Прим. пер.*

важным моментом, но поскольку наши глаза всегда в движении, пространственные и темпоральные эффекты невозможно отделить друг от друга.

Ряд весьма интересных данных, касающихся пространственной конфигурации стимула и его окружения, приводит Абрамов (1992).

Идеальным пространственным представлением поля зрения явилась бы полная спецификация сцены с пространственным разрешением, большим, чем разрешающая способность центральной ямки сетчатки, в котором каждый пиксел был бы представлен полным спектральным распределением энергии. С таким представлением общего поля зрения можно было бы получить всю информацию, необходимую для спецификации цветового восприятия каждого элемента сцены. Однако когнитивный опыт наблюдателя и темпоральные эффекты по-прежнему оставались бы неучтенными.

По ряду причин описанная спецификация поля зрения непрактична: во-первых, понадобится огромный пакет данных, которые трудно получить даже в лабораторных условиях, не говоря уже о реальной практике (от которой требовать подобного просто абсурдно); во-вторых, даже если удастся каким-то образом получить такие данные, их объем окажется столь велик, что создаст очень большие трудности в переработке информации; в-третьих, даже если преодолеть все перечисленные преграды, то неизбежно понадобится модель цветового восприятия, способная переработать весь массив данных. Такой модели не существует и вряд ли она появится в обозримом будущем. Отметим, что учет вариабельности наблюдательских суждений о цветовых ощущениях тоже привел бы к излишнему усложнению системы.

Перечисленные выше сложности диктуют необходимость упрощения ситуации, чего можно добиться, определив минимально необходимое количество компонентов поля зрения, то есть — отобрав самые важные из них. Различные модели цветового восприятия используют разные комбинации упомянутых компонентов, но наиболее полный комплект предложен Хантом (1991, 1995) для его же собственной модели. Поскольку хантовское определение поля зрения включает в себя расширенный набор компонентов, априори подходящих ко всем прочим моделям, его определение мы и приводим ниже.

Поле зрения, по Ханту, делится на четыре составляющих:

1. Стимул.
2. Проксимальное поле.
3. Фон.
4. Окружение.

На рис. 7.1 показана схема поля зрения и его компонентов (по Ханту).

Стимул

⇨ *Стимул* определен как цветовой фактор, восприятие которого мы хотим измерить.

Обычно под стимулом подразумевают равномерный патч с угловым размером приблизительно 2°. К примеру, стимул, показанный на рис. 7.1, имеет угловой размер 2°, если смотреть на рисунок с расстояния 13 см. Такой угловой

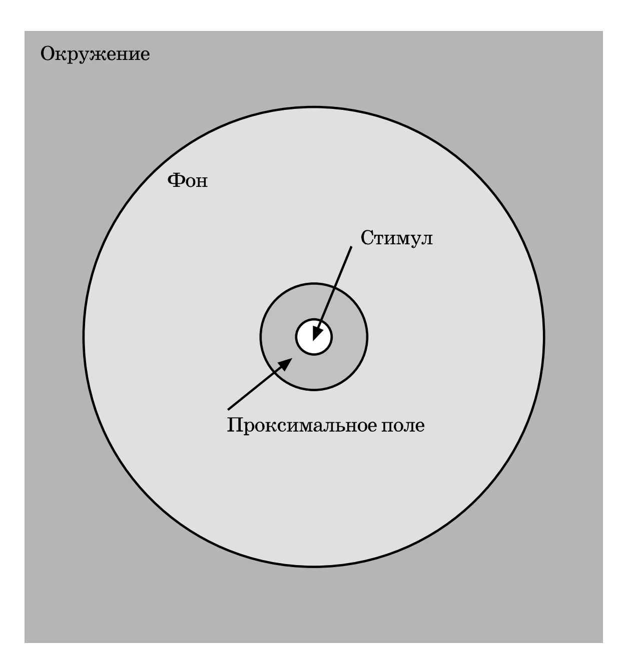


Рис. 7.1 Спецификация компонентов поля зрения. Если рассматривать данное изображение с расстояния 13 см, угловой размер будет корректным (то есть область стимула будет укладываться в визуальный угол 2°).

размер был утвержден, дабы привести поле зрения в соответствие стандартному колориметрическому наблюдателю CIE 1931, который соответствует стимулам, лежащим в диапазоне углового размера от 1° до 4° (CIE 1986). При стимулах существенно меньшего размера трихроматическое зрение начинает, как говорят, «разваливаться».

Для работы со стимулами большего углового размера (10° и выше) был принят дополнительный стандартный колориметрический наблюдатель CIE 1964.

Для данного нами определения стимула существует фундаментальное теоретическое ограничение — неоднородность сетчатки в плане цветовой чувствительности. Вместе с тем, с 1931 г. и по сей день приведенное определение вполне удовлетворяет требованиям базовой колориметрии.

Практическим ограничением действующего определения, особенно в работе с изображениями, является то, что элементы изображения по угловому размеру зачастую либо много меньше 2°, либо (реже) больше 10°. К счастью, в цветовом репродуцировании изображений данные ограничения часто сходят на нет, поскольку в задачу репродуцирования входит воспроизведение пространственного взаиморасположения цветовых стимулов, почти идентичное оригиналу. Таким образом, любые отклонения по пространственным допускам одинаково соотносятся друг с другом и в оригинале, и в копии.

В то же время, нужно быть очень осторожным, когда в процессе репродуцирования резко меняется размер изображений или когда пытаются воспроизвести некий цвет из конкретной сцены в новом визуальном контексте (к примеру, спот-цвета или образец цвета, взятый из изображения).

При рассматривании реальных сцен наблюдатели часто воспринимают цельные объекты как «однородные» стимулы, к примеру, на вопрос «какого цвета

этот автомобиль?» большинство наблюдателей даст единичный ответ, даже несмотря на то, что разные участки поверхности машины вызывают разные цветовые ощущения (и при этом в весьма широком диапазоне). Таким образом, стимулом в данном случае является не двухградусное поле, а весь объект[1].

Сказанное, как правило, не касается изображений в целом, но относится скорее к составным элементам изображения, на которые его мысленно дробит наблюдатель.

Проксимальное поле

⇨ *Проксимальное поле* определено как ближайшее окружение стимула, расширяющее стимул по всем краям и по всем направлениям на 2° углового размера.

Понятие проксимального поля необходимо для моделирования эффектов локального контраста: светлотной или хроматической индукции, оконтуривания или смазывания. Отметим, что из ныне действующих моделей только в хантовской (1991) разделяются понятия проксимального поля и фона.

Несмотря на то, что данные о проксимальном поле необходимы для детального моделирования цветового восприятия, его точная спецификация затруднена, к примеру: в изображении проксимальное поле любого элемента будет определено окружающими пикселами, данные о которых вполне доступны (как минимум, в цифровых системах), но их переработка потребует от модели цветового восприятия наличия механизма обсчета каждого пространственного элемента изображения, что весьма непрактично.[2] В тех случаях, когда проксимальное поле неизвестно, уместно приравнять его к фону.

Фон

⇨ *Фон* определен как окружение стимула, расширяющее стимул (или его проксимальное поле, если таковое известно) по всем краям и по всем направлениям на 10° углового размера .

Спецификация фона крайне необходима для моделирования симультанного контраста. Если наряду с фоном известно и проксимальное поле, то специфика-

---

[1] Здесь (и во многих других местах текста) в отношении понятия «стимул» автор употребляет профессиональный жаргон, видимо, для краткости изложения отождествляя стимул с поверхностью (или объектом). Отметим, что CIE-определение цветового стимула, данное в Международном осветительном словаре (CIE-IEC, 1987, стр. 68), звучит соответственно так: «*Цветовой стимул* — Видимое излучение, попадающее в глаз и вызывающее ощущение либо хроматического цвета, либо ахроматического». — *Прим. пер.*

[2] Не следует путать пространственные элементы цифрового изображения (состоящие из групп пикселов) с самими пикселами. Учет проксимального поля действительно потребует колоссальных программных и вычислительных ресурсов, поскольку понадобится пространственно-цветовой анализ элементов изображения. — *Прим. пер.*

ция последнего может быть использована в сложных моделях цветового восприятия.

В работе с изображениями фон стимула, подобно проксимальному полю, определить сложно: фон данного элемента изображения, как правило, организован соседними областями этого элемента, спецификация которых будет меняться от области к области изображения по мере изменения его общего содержания. Таким образом, высокоточная спецификация фона стимулов в изображениях вновь потребовала бы от модели цветового восприятия наличия механизма поточечного пересчета, что весьма непрактично. Поэтому, как правило, фон объявляют неизменным с некоей средней цветностью и коэффициентом яркости (к примеру, нейтрально-серый с коэффициентом яркости 20%).

Альтернативное определение фона звучит как «область, непосредственно прилегающая к изображению». Однако такое определение приписывает фону бо́льшую значимость, нежели она есть на самом деле.

Сложность в определении фона и его влияние на результат репродуцирования обсуждались в свое время Брауном и Фершильдом (1995, 1997).

К счастью, в большинстве случаев работы с изображениями необходимость в высокоточном определении фона минимальна, поскольку и в оригинале и в репродукции пространственное взаиморасположение цветовых стимулов почти одинаковое. Однако в спотовом цветовоспроизведении учет фона критичен, поскольку нашей задачей в данном случае является цветовоспроизведение при разных пространственных конфигурациях стимулов (к примеру, работа с пантонной системой).

Окружение

⇨ *Окружение стимула* определено как внешнее поле фона.

На практике окружение представляет собой помещение либо просмотровое место, на котором рассматриваются изображения (или иные стимулы), к примеру: на отпечатки изображений обычно смотрят при некоей средней освещенности окружения, проекционный показ слайдов проводят в темном окружении, а видео смотрят при тускло освещенном окружении.[1] Таким образом, даже в сфере работы с изображениями дать определение окружению довольно легко: окружение — это внешняя область изображения, статично заполняющая собой все поле зрения.

Спецификация окружения важна для моделирования т.н. дальнодействующей индукции (long-range induction), бликов (стимульных и внутриглазных), а также эффектов визуального контраста изображений (Бартлесон и Бренеман, 1967; Фершильд, 1995). На практике со сложностями в высокоточной спецификации окружения сталкиваются обычно тогда, когда в окружение во-

[1] Работа цветокорректора, согласно ISO 3664:2000, также должна проводиться при тускло освещенном нейтральном окружении дисплея (32–64 lux). — *Прим. пер.*

влечены стимулы широкого диапазона относительных яркостей и неравномерных пространственных конфигураций.

7.2 КОЛОРИМЕТРИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКАЦИЯ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ

Различные модели цветового восприятия обрабатывают большее или меньшее количество колориметрической информации о каждом компоненте поля зрения. Строго говоря, необходимо знать абсолютные (в единицах фотометрической яркости или освещенности) трехстимульные значения каждого компонента поля зрения, однако разные модели цветового восприятия требуют разного объема данных.

В дополнение к описанным компонентам поля зрения, моделям цветового восприятия часто необходима спецификация т.н. «адаптирующего стимула». Под адаптирующим стимулом иногда подразумевают фон, а иногда — долевое участие источника света. Таким образом, возникает необходимость в определении абсолютных трехстимульных значений самоего освещения или белого объекта под данным осветителем.

При вычислении абсолютных трехстимульных значений стимулов поля зрения необходимо использовать стандартного колориметрического наблюдателя CIE (обычно CIE 1931 2°) и стандартные геометрии измерения и просмотра. В идеале колориметрию следует выполнять со строго той же геометрией, с которой будут рассматриваться изображения, но зачастую это невозможно. Поэтому обычно приходится идти на некий компромисс, о котором в дальнейшем нельзя забывать, поскольку уступка может повлиять на корреляцию расчетов (выполненных по той или иной модели цветового восприятия) с результатами визуальной оценки стимулов.

В работе с самосветящимися дисплеями (такими, как CRT- и LCD-мониторы) абсолютные трехстимульные значения могут быть получены напрямую, путем измерения дисплея колориметром или спектрорадиометром. Однако при работе с отражающими или пропускающими носителями ситуация усложняется.

Как правило, отражающие или пропускающие материалы характеризуются спектральным коэффициентом отражения или пропускания, измеряемым спектрофотометром. Колориметрические координаты (трехстимульные значения) вычисляются затем с использованием стандартного колориметрического наблюдателя и обычно при том или ином стандартном осветителе (к примеру, CIE-осветители D65, D50, A, F2). Такие измерения и вычисления, как правило, успешно выполняются большинством колориметрических приложений.

К сожалению, изображения (или иные цветные объекты) крайне редко рассматривают в свете источника, близкого к какому-либо стандартному осветителю CIE (Хант, 1992). На практике отличия между цветами, вычисленными с использованием CIE-осветителя, и теми цветами, что мы ощущаем в свете фактического источника (пусть даже пытающегося имитировать стандартный осветитель) могут оказаться весьма существенными.

Типичный пример таких отличий дан в таблице 7.1: спектральные коэффициенты отражения семи разных патчей, выполненных цифровым фотопринте-

Таблица 7.1 CIELAB-координаты и ΔE^*_{ab}-значения для фотографических образцов, рассчитанных с использованием спектра D50- и F8-осетителей

Образец	D50			F8			ΔE^*_{ab}
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	
Серый	53.7	−2.6	−9.7	53.6	−3.2	−9.8	0.6
Красный	39.1	41.0	20.4	39.4	41.5	21.0	0.8
Зеленый	43.2	−41.4	22.8	42.9	−40.6	22.0	1.2
Синий	26.5	11.2	−28.8	26.4	9.2	−28.5	2.0
Голубой	64.2	−38.7	−29.4	63.7	−40.8	−30.6	2.5
Пурпурный	54.7	57.3	−24.8	55.0	56.3	−23.6	1.6
Желтый	85.3	0.5	63.2	85.5	2.2	63.0	1.7
Среднее							1.49

ром, были измерены и использованы для вычисления CIELAB-координат с использованием осветителей D50 и F8.

F8-осветитель, специфицированный как типичный флуоресцентный осветитель с коррелированной цветовой температурой 5000 K, считается одним из самых лучших D50-имитаторов. Реальные флуоресцентные лампы просмотровых кабин, имитирующие D50-осветитель, чаще всего имеют бóльшее спектральное отклонение от D50, нежели F8. Спектральные распределения энергии осветителей D50 и F8 (с шагом 10 нм) показаны на рис. 7.2.

В нашем примере (таблица 7.1) заметными в изображениях (и легко заметными на отдельных цветовых патчах) будут цветовые отличия в районе $\Delta E^*_{ab} = 2.5$ (прочими можно пренебречь). Однако другие источники света будут давать гораздо бóльшие ошибки. Типичный пример — использование колориметрических величин (CIELAB-координат) при цветовой балансировке печатающих устройств: колориметрические координаты указывают на то, что отпечатанные образцы должны восприниматься нейтральными ($a^* = b^* = 0.0$), но выраженный хроматический компонент при этом все равно виден. Так происходит, во-первых, из-за отличий между стандартным осветителем, использованным для вычислений, и фактическим источником света, используемым для наблюдения, и, во-вторых, из-за отличий между стандартным наблюдателем CIE и конкретным человеком, оценивающим результат.

Отличия между отдельными наблюдателями могут быть весьма выраженными: считается, что при цветовоспроизведении средняя CIELAB ΔE^*_{ab} между визуально одинаковыми (метамерными — *Прим. пер.*) стимулами для разных наблюдателей приблизительно равна 2.5 с максимально возможным разбросом до 20 единиц (Фершильд и Альфвин, 1995, 1997).

Итак, первую причину несоответствия можно устранить за счет использования при колориметрических вычислениях спектрального распределения энергии фактического просмотрового источника, но вторая причина — это принципиальное ограничение колориметрии (неизбежное следствие любого усреднения), которое невозможно устранить и можно лишь понять.

Подытожим сказанное: когда требуется высокоточная оценка цветового

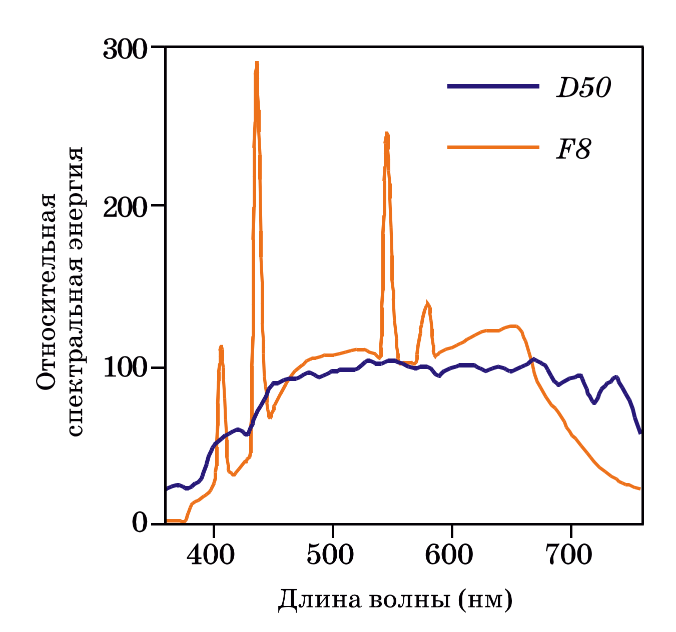


Рис. 7.2 Относительное спектральное распределение энергии CIE-осветителей D50 и F8 (нормированы к 100 по длине волны 560 нм).

восприятия, предпочтительнее использовать фактическое спектральное распределение энергии источников освещения, а не CIE-стандартное. Если таковое невозможно, то должны использоваться просмотровые кабины, источники которых максимально приближены к CIE-осветителям.

Идеальным явилось бы знание абсолютных спектральных распределений энергии (и, соответственно, абсолютных трехстимульных значений) по каждому компоненту поля зрения, но моделям цветового восприятия не требуется столь детализированная информация. Ниже описан минимум данных, необходимый по каждому компоненту поля зрения (некоторые модели требуют еще меньших данных, поскольку не учитывают всех его компонентов).

Адаптирующее поле должно быть специфицировано, как минимум, абсолютными трехстимульными значениями (альтернативно: относительными трехстимульными значениями при абсолютных яркости или освещенности).

Стимул также должен быть специфицирован абсолютными трехстимульными значениями (желательно рассчитанными по фактическому источнику).

Подобные данные нужны как по проксимальному полю, так и по фону, хотя довольно часто фон предполагается ахроматичным и, следовательно, может быть описан только своим коэффициентом яркости.

Цвет окружения не учитывается ни одной моделью: достаточно знать яркость окружения по отношению к области изображения (или стимула). Однако зачастую и эта информация оказывается избыточной, и окружение в полной мере может быть описано такими прилагательными, как «темное», «тусклое» или «среднее». Практические словесные определения возможных относительных яркостей окружения таковы: темное — 0%, тусклое — 0–20%, среднее — 20–100% от яркости сцены или яркости белой точки изображения.

7.3 ЗРИТЕЛЬСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Часто бывает трудно (особенно тем, кто имеет близкое отношение к физике и инженерному делу) поверить в то, что т.н. зрительская интерпретация и, следовательно, цветовое ощущение, зависят от конфигурации стимула и его истолкования сознанием. Однако наш личный опыт тому яркое подтверждение.

Один пример из личных наблюдений автора (и его коллег): соседский дом был выкрашен в светло-желтый цвет и парадная дверь на нем тоже была светло-желтой. Как-то поздним вечером дверь вдруг стала казаться… синей. Синяя дверь в желтом доме? — любопытно… Однако стоило присмотреться, как дверь вновь приобрела привычный желтый цвет. Весь дом был освещен интенсивно-желтым закатным солнцем, и только маленькая, едва заметная кирпичная стенка отбрасывала тень на дверь, которая оказалась освещенной только светом неба (прямые солнечные лучи на нее не попадали) и, следовательно, воспринималась синее, чем остальная часть здания. В первый момент сцена интерпретировалась как равномерно освещенные желтый дом с синей дверью. Однако, как только стало понятно, что освещение неравномерно и что дверь фактически освещена синим светом, так сразу ее восприятие сменилось с синего на желтое. Изменение в цветовом восприятии двери было полностью основано на когнитивной интерпретации освещения, и с того момента, как фактическое освещение стало понятным, ощущение уже не могло вернуться назад.

На рис. 7.3, имитирующем описанный эффект, показана геометрически неопределенная фигура, которая может быть интерпретирована двояко. Первое возможное геометрическое толкование фигуры таково: затемненная область смотрится как тень, а весь объект выглядит цельно-желтым. Второе возможное толкование: темная область не может быть тенью и интерпретируется как фрагмент объекта, «покрашенный» в другой цвет. Поворот рисунка вверх тормашками иногда усиливает впечатление. Данный эффект подобен эффекту прозрачности, показанному на рис. 6.14.

Еще один авторский пример: в темной комнате, освещенной рыжим неактиничным светом, проявлялись черно-белые фотографии, за которыми наблюдала маленькая девочка. Разумеется, отпечатки были полностью ахроматичными, но освещение имело единственный, весьма выраженный, цвет. Однако малышка настаивала на том, что узнает цвета знакомых объектов, медленно проявляющихся на фотобумаге. И только когда папа вынес фотографии на обычный свет, ребенок поверил, что «узнанных» цветов на фотографиях нет. Итак, перед нами еще один пример того, когда знание объекта рождает цветовое ощущение.

Данный феномен полностью совместим с когнитивной моделью цветового распознавания, предложенной Давыдофф (1991). Также в контексте зрительских интерпретаций интересный разговор о субъективной яркости снега предлагают Коэндеринг и Ричардс (1992).

Прочие подобные эффекты, а также систематическое описание зрительских интерпретаций, эти эффекты вызывающих, подробно описаны в пятой главе «Науки о цвете», текст которой принадлежит OSA (1963).

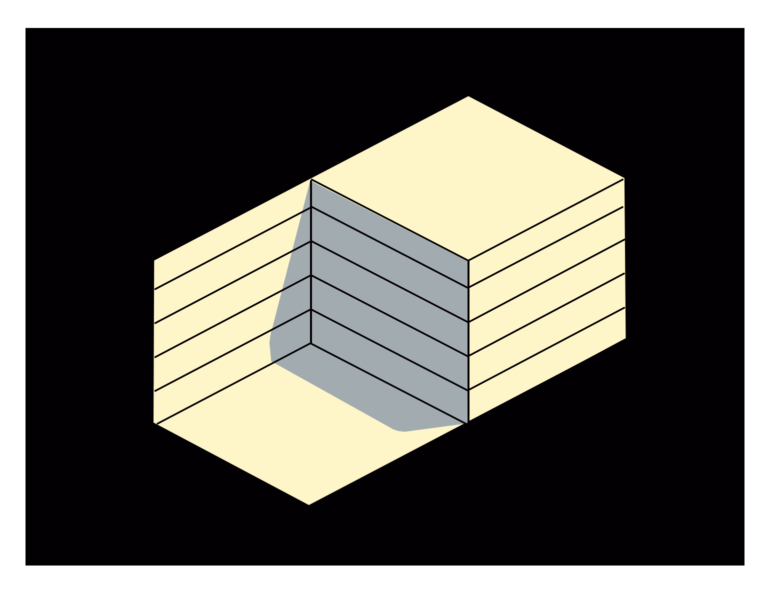


Рис. 7.3 Неопределенная фигура, иллюстрирующая концепцию когнитивного обесцвечивания осветителя. В одной пространственной интерпретации серая область смотрится как тень, в другой — воспринимается как закрашенный фрагмент фигуры.

OSA выделяет пять зрительских интерпретаций (суть которых будет раскрыта ниже):

1. «Осветитель».
2. «Освещение».
3. «Поверхность».
4. «Объем».
5. «Пленка».

Таблица 7.2 сводит воедино атрибуты цветового восприятия (см. также главу 4), имеющие большее сродство тому или иному варианту интерпретации. Наряду с обычными атрибутами цветового восприятия, теоретически могут быть учтены дополнительные: длина, размер, форма, позиция, текстура, глянец, прозрачность, подвижность, устойчивость и четкость (согласно определению OSA, 1963).

Зрительские интерпретации описаны в плане ментального толкования цветового восприятия, что удивительным образом сходно с типологией «объектов» компьютерной графики, ориентированных на их реалистичную визуализацию (Фолей, 1990; также см. гл. 16).

Данное сходство указывает на фундаментальную, неразрывную связь между восприятием и когнитивной интерпретацией стимулов.

Интерпретация «Осветитель»

Зрительская интерпретация «Осветитель» определена как цветовое ощущение, когнитивно относимое к источнику света. Возможно, данное цветовое ощущение формируется под воздействием самых ярких стимулов, находящихся в поле зрения. Таким образом, объекты, которые много светлее окружения, могут поднять восприятие на «осветительный» уровень.

Таблица 7.2 Атрибуты цветового восприятия, имеющие большее сродство с той или иной зрительской интерпретацией. Указанное в скобках означает возможность, но при малой вероятности.

Атрибут	«Осветитель» (отблеск)	«Освещение» (залитое пространство)	«Поверхность» (объект)	«Объем» (объект)	«Пленка» («Апертура»)
Субъективная яркость	***	***			***
Светлота			***	***	(***)
Полнота цвета	***	***			***
Насыщенность			***	***	(***)
Цветовой тон	***	***	***	***	***

Зрительская интерпретация «Осветитель» — это «объектная интерпретация» (то есть, цвет принадлежит объектам), которую можно классифицировать как «отблеск».

Интерпретация «Освещение»

Зрительская интерпретация «Освещение» определена как цветовое ощущение, когнитивно относимое скорее к свойству превалирующего освещения, нежели к объектам. Ранее упомянутая «синяя дверь» — это пример перехода восприятия из интерпретации «Освещение»[1] в интерпретацию «Поверхность». OSA (1963) приводит пример восприятия нерегулярных пятен, окрашенных в интенсивный желтый цвет (интерпретация «Поверхность») на теневой стороне серого железнодорожного вагона: если наблюдатель подойдет поближе, зная при этом положение солнца, и станет разглядывать полутона, он поймет, что желтые пятна возникают из-за разных преград на пути солнечного света (интерпретация «Освещение»).

Зрительская интерпретация «Освещение» — это «необъектная» интерпретация , обусловленная присутствием преград, отражающих свет и отбрасывающих тени (иногда преградами могут быть частицы, взвешенные в воздухе).

Интерпретация «Поверхность»

Зрительская интерпретация «Поверхность» определена как цветовое ощущение, когнитивно относимое к поверхности. Распознавание любого освещенного объекта — это пример интерпретации «Поверхность», которая требует наличия физической поверхности и отраженного от нее света.

Зрительская интерпретация «Поверхность» — это «объектная» интерпретация.

---

[1] В оригинале допущена опечатка: вместо «Освещение» («Illumination») набрано «Осветитель» («Illuminant»). В переводе исправлено. — *Прим. пер.*

Интерпретация «Объем»

Зрительская интерпретация «Объем» определена как цветовое ощущение, когнитивно относимое к массе некоего более или менее однородного и прозрачного вещества, к примеру: чем больше воздушных пузырей в глыбе льда, тем более ее светлота стремится к белому, но прозрачность при этом стремится к нулю. Таким образом, ощущение объема преобразуется в ощущение поверхности.

Зрительская интерпретация «Объем» — это «объектная» интерпретация, требующая наличия прозрачных трехмерных структур в поле зрения.

Интерпретация «Пленка»

Зрительская интерпретация «Пленка» (также называемая «Апертура») определена как цветовое ощущение, когнитивно относимое к рассматриванию объектов через некую пленку или отверстие в некоей плоскости, то есть без прямого «контакта» зрения с объектом, к примеру: расфокусировка поверхности может вызвать переход восприятия из интерпретации «Поверхность» к интерпретации «Пленка» («Апертура»). Заслон с отверстием на пути к объекту переводит зрение в зрительскую интерпретацию «Апертура», поскольку наблюдатель обычно фокусирует зрение на плоскости этого заслона.

Интерпретация «Пленка» («Апертура») — это «необъектная» зрительская интерпретация. Все прочие зрительские интерпретации могут быть сведены к интерпретации «Пленка» («Апертура»).

7.4 ЕЩЕ ОБ ИЗОЛИРОВАННЫХ И НЕИЗОЛИРОВАННЫХ ЦВЕТАХ

В четвертой главе были описаны т.н. изолированные и неизолированные цветовые стимулы, однако их фундаментальное значение в спецификации цветового восприятия, их упрощение и унификация в контексте зрительских интерпретаций и их влияние на спецификацию цветовых ощущений (по критериям субъективная яркость/полнота цвета и светлота/насыщенность) требуют повторного разбора. Понимание разницы между неизолированными и изолированными цветами — это наиважнейший момент в понимании концепции зрительских интерпретаций.

Изолированный цвет

⇨ Цветовое ощущение от поверхности или объекта, изолированное от других цветов.

Неизолированный цвет

⇨ Цветовое ощущение от поверхности или объекта, связанное с другими цветами.

Перцепционными атрибутами изолированных цветов являются только: цветовой тон, субъективная яркость, полнота и чистота цвета. У изолированных цветов нет атрибутов, требующих оценки относительно белого (и сходным образом освещенного) объекта.

Неизолированные цвета обладают всеми перцепционными атрибутами: цветовым тоном, субъективной яркостью, светлотой, полнотой цвета, насыщенностью и чистотой.

Вспомним, что для полной спецификации цветового восприятия неизолированных стимулов необходимы пять перцепционных размерностей: субъективная яркость, светлота, полнота цвета, насыщенность и цветовой тон. Однако в практике работы с цветом, как правило, не возникает необходимости в знании всех пяти атрибутов цветового восприятия, и обычно для неизолированных цветов интересны и оправданны лишь три относительных параметра: светлота, цветовой тон и насыщенность.

Беседу о различиях между субъективной яркостью/полнотой цвета и светлотой/насыщенностью, а также об относительной значимости этих параметров, можно найти в четвертой главе.

8 ХРОМАТИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ

В шестой главе мы обсудили различные цветовые феномены, иллюстрирующие тот тезис, что простая трехстимульная колориметрия в большинстве случаев не в состоянии адекватно описать цветовое восприятие. Многие из этих феноменов можно рассматривать как вторичные эффекты, однако хроматическая адаптация — это, несомненно, явление первого порядка.

Трехстимульная колориметрия учит, что для усредненного наблюдателя два стимула визуально соответствуют друг другу, если рассматриваются в одинаковых условиях. Любопытно, что визуальные соответствия сохраняются в очень большом диапазоне условий наблюдения. Однако, несмотря на то, что колориметрическое равенство константно, цветовое восприятие самоей пары стимулов может меняться радикально. Хроматическая адаптация — это как раз тот случай, когда соответствие сохраняется, но ощущение меняется, то есть, мы наблюдаем то самое изменение в цветовом восприятии, которое мы обязаны понять в целях успешного конструирования его моделей.

Понятие «хроматическая адаптация» относится к способности зрительной системы человека приспосабливаться к освещению, меняющемуся в широком диапазоне оттенков, более или менее сохраняя при этом цветовое восприятие объектов. Наверное, данный тезис лучше всего проиллюстрировать цветной обращаемой фотопленкой (слайдом) — то есть системой, не обладающей способностью к хроматической адаптации. Обращаемая фотопленка сбалансирована для экспонирования источниками дневного света, и если на такую пленку снимать объекты при свете ламп накаливания, результирующие слайды будут иметь неприемлемый желто-оранжевый сдвиг. Так получается потому, что фотопленка не может управлять чувствительностью своих красного, зеленого и синего эмульсионных слоев, то есть действовать подобно зрительной системе человека, управляющей чувствительностью цветовых механизмов: человеческое восприятие относительно мало меняет цвета объектов, когда освещение переходит от дневного к свету ламп накаливания.

В данной главе мы рассмотрим основные концепции хроматической адаптации, но прежде отметим, что явления, связанные с ней, изучаются с глубокой древности. Данный вопрос интересовал еще Аристотеля (Ванделл, 1995): «На тканях и вышивках цвета сильно зависят от их взаиморасположения (фиолетовый, например, кажется иным на белой шерсти, нежели на черной), а также от разницы в освещении. Вышивальщицы жалуются, что, трудясь при свете ламп, чаще путаются в этих цветах и берут неправильные».

Множество замечательных материалов, посвященных хроматической адаптации, можно найти в книгах Барлоу и Моллона (1982), Вышецкого и Стайлса (1982), Шпилльмана и Вернера (1990), Ванделла (1995). В журналах опублико-

ваны статьи Терстиге (1972), Ханта (1976), Бартлесона (1978), Райта (1981), Ленни и Д`Змура (1988).

Удачи любознательному читателю в изучении этой славной литературы!

8.1 СВЕТОВАЯ, ТЕМНОВАЯ И ХРОМАТИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИИ

⇨ *Адаптация* — это способность организма менять свою чувствительность к стимулу в ответ на изменения в условиях стимуляции.

Отметим, что общая концепция адаптации охватывает все области восприятия.

Механизмы адаптации по продолжительности могут быть сверхкороткими (порядка миллисекунд) или наоборот — сверхдлинными, тянущимися недели, месяцы и даже годы. В целом механизмы адаптации служат понижению чувствительности наблюдателя к стимулу при росте физической интенсивности последнего (к примеру, можно ясно слышать тиканье часов посреди тихой ночи и совсем не слышать его на шумном приеме).

В отношении зрения важны три вида адаптации: световая, темновая и хроматическая.

Световая адаптация

⇨ *Световая адаптация* — это процесс понижения чувствительности зрения по мере роста общего уровня освещения.

К примеру: ясной ночью легко увидеть миллионы звезд, но в полдень их на небе столько же — однако днем звезд не видно. Так получается потому, что днем суммарная яркость неба на несколько порядков выше, чем ночью, и поэтому днем чувствительность зрения понижена в сравнении с ночной чувствительностью. Таким образом, разница в яркостях ночного неба и звезд в состоянии обеспечить зрительное восприятие последних, тогда как днем она недостаточно велика.

Другой пример: представьте себе, что вы проснулись среди ночи и включили яркий свет. В первый момент вы ослеплены, не в состоянии разобрать что-либо и можете даже почувствовать легкую боль, но спустя уже несколько десятков секунд вы начинаете постепенно различать предметы. Так происходит потому, что в темноте механизмы зрения находились в наиболее чувствительном состоянии и сразу после включения света (из-за своей повышенной чувствительности) оказываются перегруженными, но спустя непродолжительное время они адаптируются, понижая чувствительность и обеспечивая тем самым нормальное зрение.

Темновая адаптация

Темновая адаптация подобна световой, за исключением того, что процесс идет в обратном направлении, то есть:

⇨ *Темновая адаптация* — это процесс повышения чувствительности зрения по мере снижения уровня фотометрической яркости.

Несмотря на то, что феномены световой и темновой адаптаций сходны между собой, — это все-таки два самостоятельных явления, обусловленные разными механизмами и выполняющие разную зрительную работу (например, световая адаптация наступает значительно быстрее, нежели темновая).

Каждый может испытать темновую адаптацию, войдя с залитой солнцем улицы в полумрак кинотеатра: в первый момент помещение кажется совершенно темным, и многие просто останавливаются на пороге, потому что ничего не видят. Однако по прошествии короткого периода времени предметы в помещении (кресла, зрители) начинают выступать из темноты. Спустя еще несколько минут они станут уже хорошо различимыми, и не составит большого труда распознать фигуры знакомых, найти нужное кресло и т.п., поскольку механизмы темновой адаптации постепенно увеличивают общую чувствительность зрительной системы.

О световой и темновой адаптациях можно говорить как об аналогии автоматическому контролю экспозиции в фотоаппаратах.

Хроматическая адаптация

Процессы световой и темновой адаптаций радикально влияют на цветовое восприятие стимулов и поэтому учитываются многими моделями цветового восприятия. Однако третий вид адаптации зрения — хроматическая адаптация — самый важный, и его обязательно должны учитывать все модели.

⇨ *Хроматическая адаптация* — это процесс в значительной мере независимой регулировки чувствительности механизмов цветового зрения.

Более того, часто звучит мнение, что хроматическая адаптация основана только на независимом изменении чувствительности трех типов колбочковых фоторецепторов (в то время как световая и темновая адаптации — это результат общего изменения чувствительности всего рецепторного аппарата). Однако важно помнить, что существуют иные механизмы цветового зрения (действующие, к примеру, на оппонентном уровне и даже на уровне распознавания объектов), способные к изменению чувствительности, которые также можно отнести к механизмам хроматической адаптации.

В качестве примера хроматической адаптации возьмем лист белой бумаги, освещенной дневным светом. Если этот лист перенести в помещение, освещенное лампами накаливания, он по-прежнему будет восприниматься белым, несмотря на то, что энергия, отраженная от листа, сменилась с преимущественно «синей», на преимущественно «желтую» (это то самое изменение, к которому не может приспособиться цветная обращаемая фотопленка, о чем мы говорили во введении к данной главе).

Рис. 8.1 иллюстрирует данную ситуацию: на рис. 8.1 (a) показана типичная сцена при дневном освещении; на рис. 8.1 (b) — та же сцена, освещенная лампа-



Рис. 8.1 (a) — сцена, освещенная дневным светом; (b) — та же сцена, освещенная светом ламп накаливания и воспринятая некоей зрительной системой, не способной к хроматической адаптации; (c) — та же сцена, освещенная светом ламп накаливания и воспринятая некоей зрительной системой при типичной хроматической адаптации по фон Кризу (подобно зрительной системе человека).



Рис. 8.2 Пример постобразов, вызванных локальной ретинальной адаптацией.
На 30 секунд зафиксируйте взгляд на черной точке, а затем переведите его на равномерную белую поверхность. Обратите внимание на цвета постобразов и сравните их с цветами оригинальных стимулов.

ми накаливания и воспринятая некоей зрительной системой, не способной к адаптации; на рис. 8.1 (c) — опять та же сцена при свете ламп накаливания, воспринятая некоей зрительной системой, способной к адаптации подобно зрительной системе человека.

Второй иллюстративный пример хроматической адаптации — т.н. *постобразы*, показанные на рис. 8.2: сосредоточьтесь на черной точке в центре фигуры и запомните позиции ее цветов; спустя примерно 30 секунд переведите взгляд на освещенную белую область, например, на белую стену или чистый лист бумаги. Обратите внимание на появившиеся цвета и их взаиморасположение. Возникшие постобразы — это результат независимого изменения чувствительности цветовых механизмов. К примеру, области сетчатки, экспонированные красным стимулом рисунка 8.2, понижают свою чувствительность к «красной» энергии по мере адаптирующей экспозиции вызывая недостаточность «красного» ответа данной области сетчатки (в норме ожидаемого при воздействии белых стимулов), в результате при взгляде на белую поверхность появляется голубой постобраз. Возникновение остальных цветов в постобразах объясняется аналогично.

Итак, если о световой адаптации можно говорить как об аналогии автоматическому контролю экспозиции, то об адаптации хроматической мы говорим как об аналогии автоматическому балансу белого в видео- или цифровых фотокамерах.

Райт (1981) дает исторический обзор того, зачем и как изучалась хроматическая адаптация.

8.2 ФИЗИОЛОГИЯ

Безусловно, феномены адаптации зрения сами по себе очень интересны, но для того чтобы должным образом их моделировать, нам нужно разобраться в физиологических механизмах этих феноменов.

Существует несколько различных механизмов адаптации, лежащих в диапазоне от строго сенсорных, через рефлекторные, к чисто когнитивным. Несмотря на то, что все механизмы адаптации еще до конца не изучены, весьма полезно по крайней мере познакомиться с их видами, дабы понять, как именно эти механизмы учтены в различных моделях цветового восприятия.

Ниже мы обсудим:

1. Зрачковый рефлекс (сужение/расширение).
2. Палочко-колбочковый переход.
3. Рецепторный контроль усиления.
4. Субтрактивные механизмы.
5. Высокоуровневую адаптацию.

Зрачковый рефлекс

Наиболее очевидный механизм световой и темновой адаптаций — это сужение и расширение зрачка.

В обычных просмотровых ситуациях диаметр зрачка меняется от 3 до 7 мм, что соответствует изменению его площади примерно в пять раз. Таким образом, изменением диаметра зрачка можно объяснить световую и темновую адаптации в пятикратном диапазоне яркостей. Это может показаться весьма существенным, однако диапазон уровней яркостей, в котором зрительная система человека может успешно функционировать, составляет 10 порядков, и поэтому ясно, что зрачок обеспечивает лишь один из механизмов адаптации, которым нельзя объяснить все зрительные возможности. Следовательно, должны существовать дополнительные инструменты адаптации, являющиеся неотъемлемой частью как физиологии сетчатки, так и вышестоящих отделов зрительной системы.

Палочко-колбочковый переход

В сетчатке человека содержатся фоторецепторы двух классов: палочки и колбочки. Колбочки менее чувствительны, чем палочки, и реагируют при высоких уровнях освещения, в то время как палочки более чувствительны и реагируют при низких уровнях освещения. Переход от колбочкового зрения к палочковому (возникающий на яркостях порядка 0.1–1.0 cd/m^2) обеспечивает еще один механизм световой и темновой адаптаций.

Понижение чувствительности колбочек по мере роста уровней яркости (световая адаптация) происходит довольно быстро, требуя максимум нескольких минут, тогда как повышение чувствительности палочек (по мере падения уровня яркости) требует большего времени. Сказанное можно проиллюстрировать классической кривой темновой адаптации, демонстрирующей восстановление

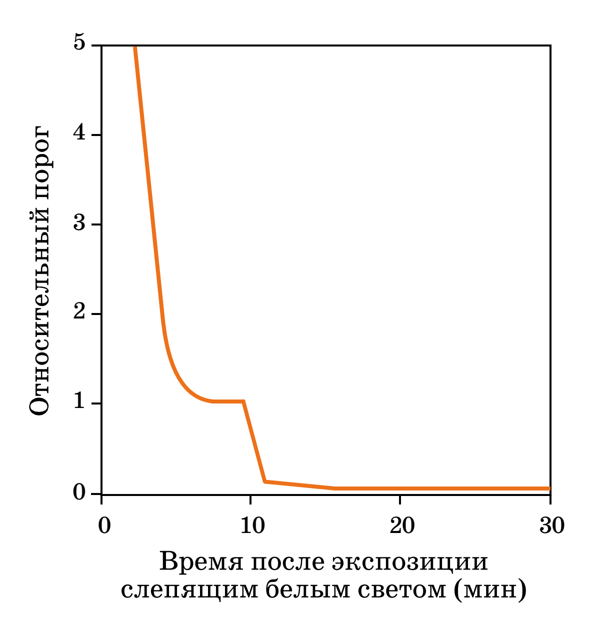


Рис. 8.3 Типичная кривая темновой адаптации, демонстрирующая восстановление порога после экспозиции ярким белым светом.

порога после экспозиции экстремально ярким адаптирующим стимулом (рис. 8.3). Начало графика демонстрирует процесс восстановления чувствительности колбочек, завершающийся спустя несколько минут (что показывает горизонтальный участок кривой). Затем, примерно через 10 минут, палочки восстанавливают достаточную чувствительность и становятся чувствительнее колбочек, а кривая, соответственно, снова падает. Спустя примерно 20 минут, палочки выходят на максимальную чувствительность, и график темновой адаптации вновь выравнивается. Приведенная кривая объясняет динамику восприятия, наблюдаемую после входа в темный кинозал.

Вдобавок к обеспечению механизма световой и темновой адаптаций палочко-колбочковый переход оказывает радикальное влияние на цветовое восприятие: вспомним, что существует три вида колбочек, обеспечивающих цветовое зрение, но при этом только один вид палочек, и, таким образом, если яркость снижена до уровня, при котором активны только палочки, наблюдатель фактически становится цветослепым, воспринимая мир через градации серого.[1]

На этом наш интерес к палочко-колбочковому переходу в контексте моделей цветового восприятия и моделей хроматической адаптации исчерпан, и мы должны теперь обратиться к иным механизмам. (Примечание: влияние пало-

[1] Данное утверждение несколько формализовано: ощущение серого (нейтрального) — сугубо фотопическое, инициированное колбочковым ответом, то есть именно *цветовое* ощущение, хотя и считающееся ахроматическим (равноудаленным от маргинальных насыщенностей по всем возможным цветовым тонам). При палочковом зрении ощущение полутонов весьма специфично и его вообще трудно охарактеризовать, тем более как «серое». Убедиться в неоднозначности «серого» при палочковом зрении легко, сосредоточившись на своих ощущениях в скотопических условиях просмотра, например, при свете звезд или в едва освещенной комнате. — *Прим. пер.*

чек на цветовое восприятие может оказаться значимым на низких уровнях фотометрической яркости, что учтено хантовской моделью цветового восприятия).

Рецепторный контроль усиления

Наверное, наиболее важным механизмом хроматической адаптации является процесс независимого изменения чувствительности фоторецепторов, называемый иногда *рецепторным контролем усиления*.

Контроль усиления можно представить себе как вариации отношений между числом фотонов, падающих на фоторецептор, и электрохимическим сигналом, который выдает фоторецептор в ответ на фотонное воздействие. Хроматическая адаптация будет обеспечена снижением усиления при большом числе фотонов (высокие уровни возбуждения для специфического вида колбочек) и его увеличением при их недостатке. Ключ к хроматической адаптации в том, что контроль усиления по каждому из трех типов колбочек является независимым. (Безусловно, контроль усиления является также механизмом и световой адаптации, но световая адаптация может быть реализована за счет синхронного контроля усиления колбочками всех трех типов, поэтому независимый механизм хроматической адаптации здесь избыточен).

Физиологически изменения в фоторецепторном усилении можно объяснить истощением колбочкового пигмента на высоких уровнях яркости: свет разрушает молекулы пигмента (этап процесса фототрансдукции[1]), и молекул становится недостаточно для дальнейшего зрительного ответа. Следовательно, чем выше интенсивность стимула, тем меньше остается фотопигмента и тем ниже чувствительность фоторецепторов.

Истощением пигмента можно вполне удовлетворительно объяснить процесс понижения колбочковой чувствительности, но имеются данные, что зрительная система подобным же образом адаптируется и на тех уровнях яркости, для которых истощение пигмента нехарактерно. Такая адаптация, как полагают, обеспечивается механизмами контроля усиления на уровне горизонтальных, биполярных и ганглиозных клеток сетчатки. Контроль усиления в нерецепторных клетках сетчатки помогает объяснить некоторые низкочастотные пространственные характеристики хроматической адаптации.

Делахант и Брайнард (2000) говорят о некоем взаимодействии между колбочками разных типов в процессе хроматической адаптации.

Субтрактивные механизмы

В дополнение к контролю усиления существует психофизическое доказательство существования т.н. субтрактивных механизмов хроматической адаптации (Варлавен, 1976; Шевелл, 1978). Физиологические механизмы субтрак-

[1] Фототрансдукция — процесс возникновения в светочувствительной клетке электрического потенциала (порядка 40 мВ) за счет обратимого химического преобразования родопсина под воздействием квантов света. — *Прим. пер.*

тивной адаптации можно выявить путем исследования т.н. темпорального импульсного ответа колбочковых фоторецепторов, который двойственен и может усиливать динамические и подавлять статические сигналы. Подобные процессы обнаруживаются в т.н. латеральных ингибиторных механизмах сетчатки[1], которая благодаря им выдает пространственно-антагонистичные импульсные ответы, усиливающие реакцию на пространственно-неоднородные стимулы и подавляющие реакцию на пространственно-однородные.

Физиологические модели мультипликативного (усиление) и субтрактивного (подавление) механизмов адаптации (Хано и колл., 1987; Хано и Смит, 1989) могут быть полностью совместимыми с теми моделями цветового восприятия (глава 9), которые учитывают лишь контроль усиления, предполагая при этом, что субтрактивный механизм имеет место после нелинейной компрессии.

Если функцию нелинейного ответа прологарифмировать, то субтрактивные изменения становятся идентичными мультипликативным — такая простая математическая манипуляция обеспечивает согласование результатов пороговой психофизики, физиологии и науки о цветовом восприятии, а также выдвигает на передний план значимость нелинейных компрессий как механизмов адаптации.

Рис. 8.4 демонстрирует функцию нелинейного ответа, типичную для зрительной системы человека (или любой из систем визуализации). Функция отражает уровень порога, ниже которого ответ постоянен, и уровень насыщения, выше которого ответ также постоянен.

Три входных позиции иллюстрируют различные уровни адаптации в соотношении 100:1. Как видно из рис. 8.4, диапазон входных стимулов 100:1 выдает малый выходной диапазон ответов на низком и высоком уровнях адаптирующих яркостей и большой выходной диапазон на промежуточных уровнях.

Понижение ответа на низких уровнях — это фундаментальное ограничение чувствительности обсуждаемых механизмов, в то время как компрессию ответа на высоких уровнях можно счесть формой адаптации (понижение чувствительности при повышении входного сигнала).

Функции нелинейного ответа (как, например, показанные на рис. 8.4), необходимы моделям цветового восприятия для прогнозирования таких феноменов, как эффект Стивенса и эффект Ханта (см. гл. 6).

Высокоуровневые механизмы адаптации

До сего момента мы обсуждали низкоуровневые процессы переднего края зрительной системы, т.е. работу механизмов, отвечающих на очень простые стимульные конфигурации и адаптирующих к ним.

Вебстер и Моллон (1994) предлагают интересный материал, иллюстрирующий отношения между пространственным контрастом, цветовым восприятием и высокоуровневыми механизмами. Они также приводят ряд примеров адапта-

---

[1] Латеральные ингибиторные механизмы, то есть механизмы подавления (ингибиции) активной клеткой сетчатки функциональной активности смежных клеток, приводят в действие процесс т.н. латерального торможения зрительных нейронов. — *Прим. пер.*

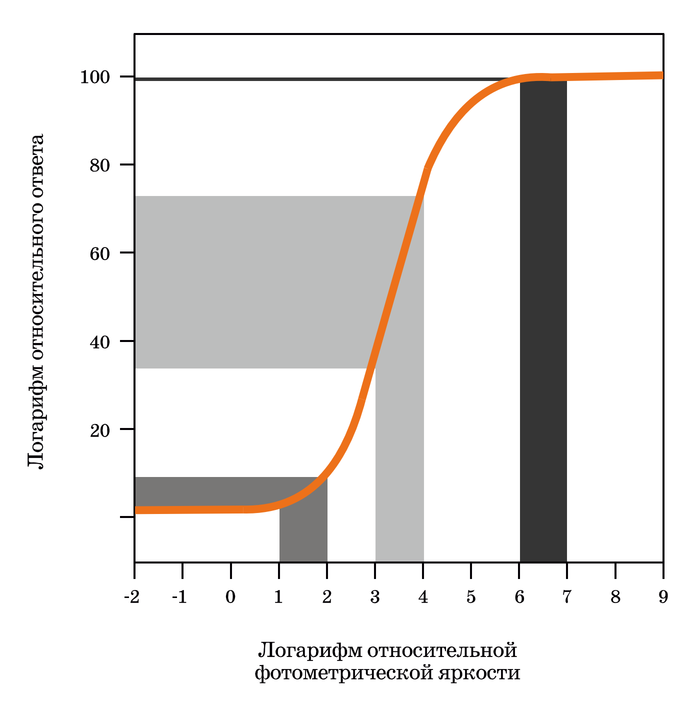


Рис. 8.4 Функция ответа зрительной системы человека, иллюстрирующая его компрессию на низких и высоких уровнях входного сигнала.[1]

ции (см. ниже), которая должна иметь место на высших уровнях зрительной системы (то есть в коре головного мозга):

1. Эффект Мак-Коллоу.
2. Пространственно-частотная адаптация.
3. Адаптация к движущимся стимулам.

Перечисленные примеры полезно рассмотреть как иллюстрацию к иным видам высокоуровневой адаптации, которые еще не обсуждались.

Эффект Мак-Коллоу

Чтобы познакомиться с данным эффектом нужно периодически смотреть на комбинацию красных и черных полос одной ориентации, скажем горизонтальной, а затем на другую комбинацию зеленых и черных полос другой ориентации, например, вертикальной. Если рассматривать каждую из комбинаций в течение нескольких секунд, переходя от одной к другой и обратно, то никаких простых постобразов не образуется.

Если после периода адаптации, длящегося примерно четыре минуты, наблюдатель переведет взгляд на комбинацию черных и белых полос с пространственной частотой, сходной с частотой адаптирующих комбинаций, то черно-белые комбинации вертикального положения станут восприниматься чер-

[1] В оригинале ось ординат поименована как «Относительный ответ», но исходя из логики изложения, а также из закона Стивенса здесь должен быть «Логарифм относительного ответа». В переводе исправлено.— *Прим. пер.*

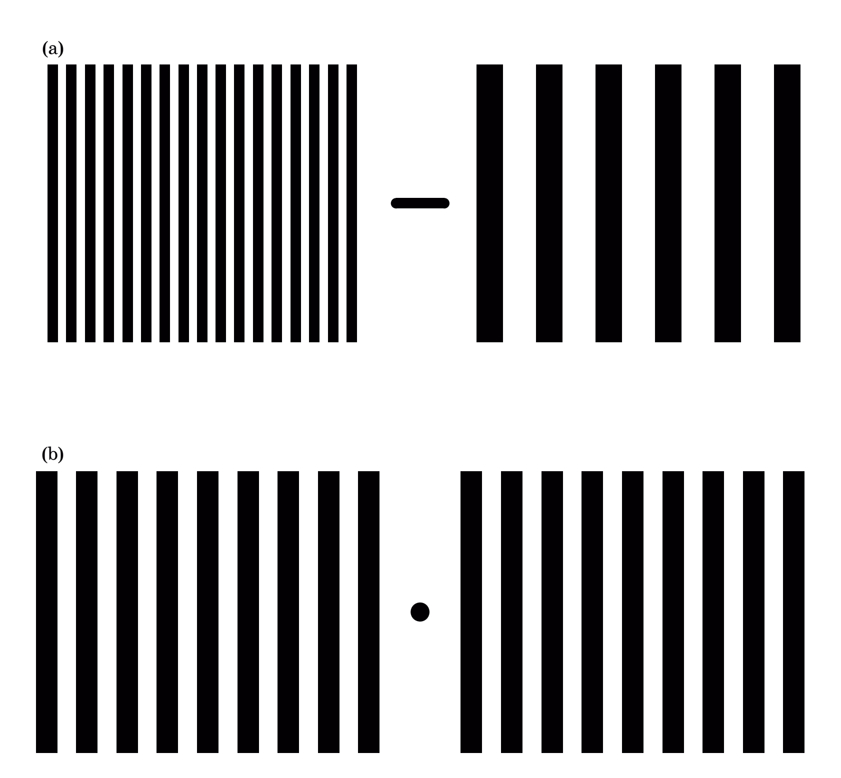


Рис. 8.5 Решетки стимулов, иллюстрирующие пространственно-частотную адаптацию. В течение 60 сек. смотрите на черную полоску верхнего рисунка (a), а затем зафиксируйте взгляд на черной точке нижнего рисунка (b). Обратите внимание на восприятие пространственных частот в левом и правом наборе стимулов.

но/розовыми, а комбинации горизонтального положения — черно/светло-зелеными. Эффект зависит от цвета и ориентации адаптирующих стимулов и не может быть истолкован как простой постобраз, поскольку предполагает адаптацию на корковом уровне зрительной системы (где были обнаружены нейроны, отвечающие на конкретные пространственную ориентацию и пространственную частоту стимулов). Интересно, что данный эффект весьма затяжной и может длиться до нескольких дней (и более)!

Прекрасную иллюстрацию эффекта Мак-Коллоу находим у Барлоу и Моллона (1982).

Пространственно-частотная адаптация

Пространственно-частотную адаптацию можно наблюдать, исследуя рис. 8.5: адаптируйтесь по рисунку 8.5 (a), на одну-две минуты сосредоточив взгляд на горизонтальной полоске. Дабы избежать появления постобразов, не фиксируйтесь на отдельной точке, а все время скользите взглядом по полоске. По завершении периода адаптации переведите взгляд на черную точку в центре рисунка 8.5 (b): вам будет казаться, что левая комбинация полос рисунка 8.5 (b) имеет меньшую пространственную частоту, чем правая, хотя левый и правый комплекты полос физически одинаковы. Отличие в восприятии после адаптации по рис. 8.5 (a) вызвано работой механизмов, чувствительных к стимулам различных пространственных частот. Если адаптироваться по стимулам высо-

кой пространственной частоты, то все прочие стимулы будут восприниматься с меньшей пространственной частотой, и наоборот. Короче говоря, пространственно-частотная адаптация — это функция клеток коры головного мозга, селективно реагирующих на стимулы с разными пространственными частотами.

Адаптация к движущимся стимулам

Адаптация к движущимся стимулам свидетельствует о подобных процессах, происходящих во времени. Пример адаптации к движущимся стимулам мы наблюдаем, когда смотрим титры в конце кинофильма (или двигаем текст на экране компьютера): если в течение нескольких минут следить за ползущими вверх титрами, то можно заметить, что финальная строка, застывшая на экране, воспринимается как движущаяся вниз (и неподвижная одновременно!). Данный эффект возникает потому, что корковые механизмы, отвечающие за восходящее движение, адаптировались к нему, пока шли титры. Когда движение прекращается, реакция механизмов, отвечающих за восходящее и нисходящее движения, должна быть обнулена, но адаптированные (то есть утомленные) «восходящие» механизмы не сразу реагируют так, как должны, и в результате неподвижный текст воспринимается движущимся вниз.

Адаптацию к движущимся стимулам иногда можно наблюдать после долгой езды на автомобиле по шоссе: зрительная система адаптируется к встречному движению и затем, когда машина останавливается, некоторое время кажется, что весь внешний мир движется назад (тогда как реального движения нет).

Обсуждавшиеся выше примеры кортикальной адаптации приводят к следующему логическому заключению: если в зрительной системе существуют адаптационные механизмы столь высокого уровня, то, наверное, также существуют и когнитивные механизмы адаптации? Ответ на этот вопрос — ниже.

8.3 СЕНСОРНЫЕ И КОГНИТИВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Велик соблазн убедить себя в том, что хроматическая адаптация — это лишь сенсорный механизм, автоматически реагирующий на изменения в конфигурации стимулов. Однако со всей ясностью показано, что хроматическая адаптация зависит в том числе от нашего знания объектов и характера освещения (Фершильд 1992, 1993). То есть, мы говорим о существовании когнитивных механизмов адаптации.

Итак, механизмы хроматической адаптации можно разделить на два класса:

Сенсорные — автоматически реагирующие на энергию стимула.

Когнитивные — реагирующие на основании знания наблюдателем содержимого сцены.

Сенсорные механизмы

Сенсорные механизмы хроматической адаптации хорошо известны и широко обсуждаются в научной литературе по зрению и цветовому восприятию. В целом, полагают, что физиология этих механизмов состоит в контроле чувст-

вительности фоторецепторов и нейронов на первых стадиях работы зрительной системы, о чем говорилось ранее. Самые современные теории и самые современные модели сенсорной хроматической адаптации уходят корнями в работу фон Криза, который в 1902 г. писал:

«...отдельные компоненты органа зрения полностью независимы друг от друга, и каждый утомлен или адаптирован исключительно в рамках своей функции».

С высоты сегодняшнего знания слова фон Криза звучат не очень корректно, но самоя концепция, несомненно, точна и дает понимание сути. Сегодня тезис о том, что хроматическая адаптация частично реализуется за счет нормировки колбочковых сигналов, известен как *закон фонкризовских коэффициентов,* который лежит в основе всех современных моделей хроматической адаптации и моделей цветового восприятия.

Когнитивные механизмы

Когнитивные механизмы периодически обсуждаются на страницах научных изданий, но поскольку числовое описание когнитивных эффектов затруднено, о них говорят мало и их четкой теории не существует. Чтобы лучше понять смысл механизмов когнитивной хроматической адаптации, уместно процитировать тех, кто упоминал об этих механизмах в течение последних двух веков.

Гельмгольц в своем трактате по физиологической оптике (1866) высказался о цветовом восприятии объектов следующим образом:

«Мы привыкаем оценивать цвет предмета так, будто бы он освещен белым светом; но поскольку нас интересует только цвет — мы не осознаем ощущений, на которых основано наше суждение».

Геринг (1920) — автор оппонентной теории цветового зрения, выдвинул концепцию памятных цветов:

«Все объекты, уже знакомые нам по опыту, или те, о которых мы говорим, что хорошо знаем их цвет, — мы видим через призму нашей цветовой памяти».

Джадд (1940), который внес неоценимый вклад в науку о цвете, говорит о двух видах механизма хроматической адаптации:

«Процессы, посредством которых наблюдатель адаптируется к осветителю или нивелирует большинство эффектов, связанных с источником недневного света, очень сложны, и известно лишь то, что они частично ретинальны, частично кортикальны».

Эванс (1943), автор монографий и лекций по многим аспектам цветной фотографии и цветового восприятия, высказал соображение о том, почему цвета на фотоотпечатках выглядят вполне приемлемо:

«<...>в повседневной жизни мы привыкли считать цвет большинства объек-

тов неизменным благодаря большей склонности человека к запоминанию цветов, нежели к непосредственному цветовому восприятию».

Джеймсон и Гурвич (1989) говорят о ценности множественных механизмов хроматической адаптации, обеспечивающих получение важных данных об изменениях в окружающей обстановке (например, погоде, времени суток, характере освещения), а также получение информации о постоянных физических свойствах объектов сцены.

И наконец, Давыдов (1991) опубликовал монографию о когнитивных аспектах цветового восприятия и распознавания объектов.

Твердая копия и экранное отображение

Как уже было сказано, хроматическая адаптация очень сложна и реализуется за счет сенсорных и когнитивных механизмов. Помнить об этих двух типах механизмов при просмотре изображений на экранах мониторов чрезвычайно важно. Если изображение репродуцировано на носителе, сходном с оригиналом, и рассматривается в аналогичных условиях, то можно без опаски предположить, что механизмы хроматической адаптации, активизирующиеся как при просмотре оригинала, так и при просмотре его репродукции, — сходны. Но что происходит, когда оригинал выполнен на одном носителе, например, на экране монитора, а его репродукция — это твердая копия?

Ряд экспериментов, количественно описывающих составляющие хроматической адаптации (Фершильд, 1992, 1993), показал, что часть механизмов, которые активны при рассматривании твердой копии (или реальной сцены), неактивны при рассматривании экранных изображений.

Когда мы смотрим на твердую копию, изображение воспринимается как объект, освещенный превалирующим светом, то есть активны механизмы обеих категорий: сенсорные, отвечающие на спектральное распределение энергии стимула, и когнитивные, обесцвечивающие источник освещения. Изображение на экране не может интерпретироваться как освещенный объект, следовательно, у нас нет осветителя с «известным» цветом и активны только сенсорные механизмы адаптации.

В сказанном можно убедиться, если посмотреть на лист белой бумаги под светом лампы накаливания и сравнить возникшее ощущение с ощущением от равномерного белого поля на экране CRT- (или LCD-) дисплея, настроенного на точно такие же цветность и яркость и находящегося в темной комнате. Бумага будет восприниматься белой или слегка желтоватой. Экран будет восприниматься желтым с относительно высокой насыщенностью. Если, к примеру, осветить бумагу светом самого дисплея, то бумага опять будет восприниматься белой, а экран будет оставаться желтым!

Модели цветового восприятия, такие, как RLAB, модель Ханта, CIECAM02 включают в себя механизмы, в той или иной степени учитывающие эффект когнитивного обесцвечивания осветителя.

Временной аспект адаптации

Наряду со всем сказанным выше о хроматической адаптации очень важным является ее временной аспект, который в контексте оценки цветового восприятия подробно исследован Фершильдом и Ленни (1992), а также Фершильдом и Ренифф (1995). Результаты исследования показали, что через 60 секунд после смены цветности адаптирующего освещения (при его постоянной интенсивности) сенсорные механизмы хроматической адаптации реализуются на 90%. Полагают, что при экспертной оценке цвета общее правило таково: к оценке следует приступать только по истечении шестидесяти секунд, поскольку это минимальный отрезок времени, необходимый для адаптации к данным условиям просмотра. Адаптация проходит чуть медленнее, когда вместе с цветностью источника меняется и его яркость (Хант, 1950).

Когнитивные механизмы адаптации основаны на нашем знании конфигурации стимула и последующей интерпретации этого знания. Таким образом, можно утверждать, что когнитивные механизмы адаптации срабатывают мгновенно — как только мы получаем нужные данные. Однако в некоторых эксклюзивных просмотровых ситуациях время, необходимое для интерпретации сцены, может быть очень большим, а иногда — бесконечным.

8.4 СОГЛАСОВАННЫЕ ЦВЕТОВЫЕ СТИМУЛЫ

Наиболее доступными визуальными данными о хроматической адаптации являются данные о т.н. согласованных цветовых стимулах.

⇨ *Согласованные цветовые стимулы* — это два стимула, предъявляемые в разных условиях просмотра, но соответствующие друг другу по ощущению.

К примеру, стимул, описанный трехстимульными значениями $X_1Y_1Z_1$, предъявленный в одних условиях просмотра, может восприниматься точно так же, как второй стимул, описанный значениями $X_2Y_2Z_2$ и предъявленный в других условиях просмотра. $X_1Y_1Z_1$ и $X_2Y_2Z_2$ в совокупности с соответствующими спецификациями условий просмотра несут информацию о паре согласованных цветовых стимулов. Важно отметить, что значения $X_1Y_1Z_1$ и $X_2Y_2Z_2$ крайне редко бывают идентичными.

Данные о согласованных цветовых стимулах можно получить с помощью множества экспериментальных методов. Некоторые из них мы кратко опишем ниже.

Асимметричное соответствие

Поскольку для получения пакета данных о согласованных цветовых стимулах требуется визуальное соответствие в разных условиях просмотра, то такие визуальные эксперименты часто называют *экспериментами по асимметричному соответствию*.

Отметим, что классические цветовые равенства получают непосредственно,

то есть сравнивая два стимула, что называется, «сторонка к сторонке». Однако, коль скоро требуются разные условия просмотра, такая методика неосуществима, если не сделаны некие упрощающие допущения. Возможно, наиболее изящным примером таких допущений является эксперимент Мак-Адама (1961), в котором отличия в условиях просмотра создавались на уровне сетчатки.

В эксперименте Мак-Адама две разных области сетчатки (левая и правая половины) экспонировались различными адаптирующими стимулами, а затем предъявлялись тестовый и уравнивающий стимулы — каждый на своей половине поля зрения. Данный метод требует допущения, что адаптация каждой из половин сетчатки подобна адаптации, характерной для нормальных условий просмотра. Данное допущение, вероятнее всего, ошибочно, и описанная техника, носящая название «дифференциально-ретинальной», сегодня представляет собой лишь историческую ценность.

Гаплоскопическое соответствие

Следующий класс экспериментов — эксперименты по получению т.н. *гаплоскопического соответствия*, при которых один глаз адаптирован к одним условиям, а другой — к другим. Одному глазу предъявляется тестовый стимул, а уравнивающий — другому. Гаплоскопические эксперименты требуют допущения, что адаптация проходит по каждому глазу в отдельности. Такое допущение соответствует сенсорным механизмам, но, разумеется, не соответствует когнитивным. Некоторые преимущества и недостатки гаплоскопических экспериментов в исследовании цветового восприятия описаны Фершильдом и коллегами (1994).

Хант (1952) приводит пример одного из классических гаплоскопических исследований, а Бренеман (1987) описывает хитроумную установку для получения гаплоскопических соответствий. Масштабное исследование с использованием гаплоскопического просмотра предметных цветовых стимулов[1] выполнено Японской Цветовой Научной Ассоциацией (Color Science Association of Japan) (Мори и колл., 1991).

Согласование по памяти

Для того чтобы уйти от дифференциально-ретинального или гаплоскопического методов, нужно пожертвовать точностью прямого сравнения в обмен на более реалистичные условия просмотра. Данному требованию отвечает *метод согласования по памяти*. При согласовании по памяти наблюдатели устанавливают соответствие между запомненным стимулом, наблюдавшимся в одних условиях просмотра, со стимулом, наблюдаемым в других условиях.

Хельсон, Джадд и Уоррен (1952) использовали различные варианты согласования по памяти, при которых наблюдатели присваивали манселловские коор-

[1] То есть несамосветящихся стимулов, полученных за счет отражения света от неких объектов. — *Прим. пер.*

динаты различным цветовым стимулам, то есть сравнивали стимулы с манселловскими образцами, запомненными при стандартных условиях просмотра.

Райт (1981) для изучения хроматической адаптации предложил исключительно удобный метод сравнения по ахроматической памяти (согласование по серому ощущению), который широко использовался для получения различных данных о согласованных цветовых стимулах (Фершильд, 1990, 1991, 1992, 1993).

Величинная оценка

Еще один метод, реализуемый в естественных условиях просмотра, — это метод *величинной оценки*. При величинной оценке наблюдатели присваивают своему ощущению значения по различным атрибутам восприятия: светлоте, насыщенности и цветовому тону или по субъективной яркости, полноте цвета и цветовому тону. То есть такие эксперименты вполне могут снабдить нас информацией о цветовом восприятии на уровне данных о согласованных цветовых стимулах.

О серии масштабных экспериментов по величинной оценке сообщил Луо (1991), а позднее сведения были подытожены Луо и Хантом (1994).

Сравнения по разным носителям

Браун и колл. (1996) опубликовали отчет о серии масштабных экспериментов по сравнению изображений, воспроизведенных на разных носителях, при различных методах просмотра, и пришли к выводу, что метод согласования по краткосрочной памяти дает самые достоверные результаты. Стоит отметить, что исследование Брауна и колл. (1996) свидетельствует о непредсказуемости цветового восприятия в широко распространенной практике одновременного сравнения отражающих отпечатков с изображением на экране CRT-мониторов (то есть прогноз соответствия изображений при раздельном просмотре не оправдывается).

* * *

Какие выводы мы можем сделать из результатов описанных выше экспериментов? На рис 8.6 показаны данные о согласованных цветовых стимулах, полученные в исследовании Бренемана (1987): кружками отмечены цветности стимулов при адаптации по D65-осветителю, которые соответствуют согласованным цветностям при адаптации по А-осветителю (отмечены треугольничками). Приведенные данные могут быть смело истолкованы как пары согласованных цветовых стимулов, отражающих соответствие по параметрам светлоты-насыщенности при переходе из одних условий просмотра к другим. Поясним: светлота и насыщенность — это доминирующие параметры восприятия при интуитивной оценке неизолированных цветовых ощущений. С таким допущением данные о согласованных цветовых стимулах можно использовать для:

— тестирования модели цветового восприятия (взяв при этом набор значений по первым условиям просмотра);

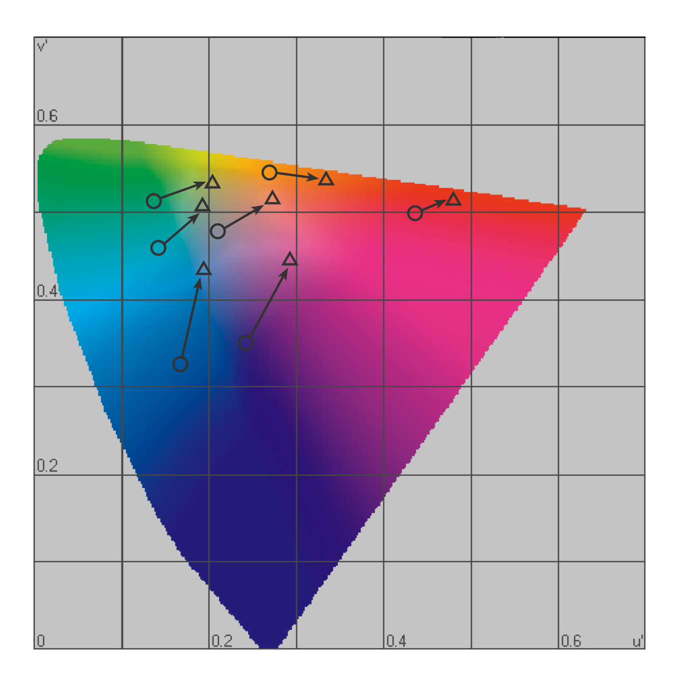


Рис. 8.6 Пример данных о согласованных цветовых стимулах при переходе от адаптации по источнику с цветностью D65-осветителя (кружки) к адаптации по источнику с цветностью А-осветителя (треугольнички). Вычерчено по u`v`-диаграмме цветностей.

— использования модели для прогнозирования соответствий по светлоте-насыщенности (при вторых условиях просмотра);

— сравнения прогнозов с результатами визуальной оценки.

Тот же вид тестирования может быть выполнен в отношении упрощенной модели, известной как *модель смены хроматической адаптации* (Chromatic Adaptation Transform — CAT).

Модель смены хроматической адаптации не включает в себя величин, коррелирующих с атрибутами цветового восприятия, такими как светлота, насыщенность и цветовой тон: она лишь преобразует трехстимульные значения стимула при одних условиях просмотра в соответствующие трехстимульные значения при других условиях.

8.5 МОДЕЛИ

Как уже было сказано в предыдущем разделе, модель хроматической адаптации позволяет прогнозировать данные по согласованным цветовым стимулам. В общем виде модель хроматической адаптации может быть выражена уравнениями 8.1–8.3:

$$L_{\text{а}} = f(L, L_{\text{на белый}}, \ \dots) \tag{8.1}$$

$$M_{\text{а}} = f(M, M_{\text{на белый}}, \ \dots) \tag{8.2}$$

$$S_{\text{а}} = f(S, S_{\text{на белый}}, \ \dots) \tag{8.3}$$

Общая модель хроматической адаптации создана для прогнозирования трех колбочковых сигналов $L_а$, $M_а$ и $S_а$ по завершении воздействия всех эффектов адаптации на изначальные сигналы L, M и S. Модель требует данных, как минимум, о колбочковых возбуждениях адаптирующим стимулом $L_{\text{на белый}}$, $M_{\text{на белый}}$ и $S_{\text{на белый}}$. Вполне вероятно, что высокоточная модель также потребовала бы дополнительной информации, место которой в уравнениях 8.1–8.4 отмечено троеточиями.

Модель хроматической адаптации можно преобразовать в модель смены хроматической адаптации путем объединения прямой модели для одних условий просмотра с инвертной моделью для других. Часто такое преобразование выражают с помощью CIE-трехстимульных значений (формула 8.4):

$$X_2Y_2Z_2 = f(X_1Y_1Z_1, XYZ_{\text{1-го белого}}, XYZ_{\text{2-го белого}}, \ \ldots) \quad (8.4)$$

Для того чтобы иметь возможность точно смоделировать физиологические механизмы хроматической адаптации, необходимо выразить стимулы в LMS-понятиях колбочковых возбуждений, а не в трехстимульных значениях CIE XYZ. К счастью, LMS-колбочковые возбуждения с приемлемой точностью могут быть вычислены путем линейного преобразования CIE-трехстимульных значений (3×3-матрица). Таким образом, типичный расчет смены хроматической адаптации можно описать так, как показано на поточной диаграмме рисунка 8.7:

1. Начинаем с CIE-трехстимульных значений ($X_1Y_1Z_1$) для первых условий просмотра.

2. Преобразуем их в колбочковые возбуждения ($L_1M_1S_1$).

3. Подключаем набор данных по первым условиям просмотра (VC_1)[1] и при этом задействуем модель хроматической адаптации для прогнозирования адаптированных колбочковых сигналов ($L_аM_аS_а$).

4. Для определения согласованных стимулов инвертируем процесс, исходя из набора данных по вторым условиям просмотра (VC_2) и по-прежнему действуя в LMS-понятиях ($L_2M_2S_2$).

5. Переходим к окончательным CIE-трехстимульным значениям ($X_2Y_2Z_2$).

Примеры специфических моделей хроматической адаптации даны в главе 9. Подробнее о современных методах измерения LMS-колбочковых чувствительностей и их взаимоотношениях с CIE-трехстимульными значениями см. в работах Ханта и колл. (1998), Логвиненко (1998) и Стокмана с колл. (1999, 2000). Отметим также, что Международная комиссия по освещению (CIE, 2003) недавно опубликовала технический отчет, описывающий текущее положение дел в сфере вычислений смены хроматической адаптации.

Модели хроматической адаптации прогнозируют согласованные цветовые стимулы и, следовательно, могут быть использованы для цветового репродуцирования в условиях просмотра, отличных от условий просмотра оригинала.

---

1 Viewing Conditions (VC) — условия просмотра. — *Прим. пер.*

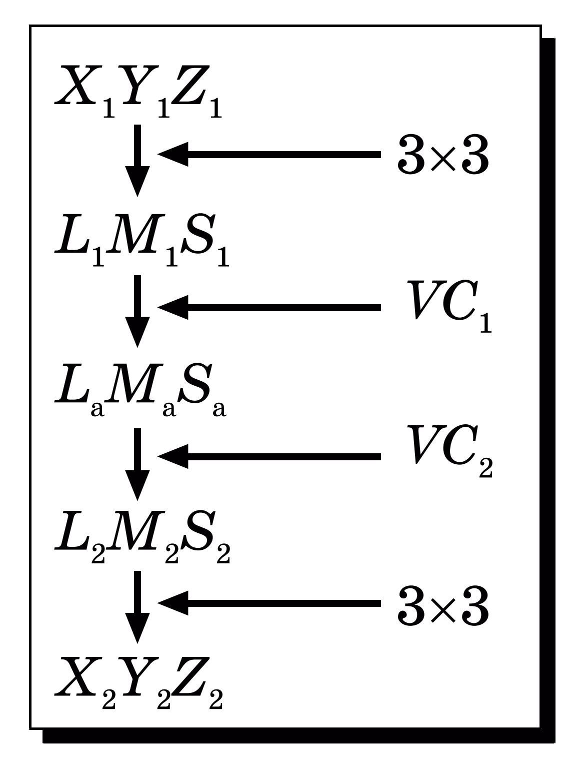


Рис. 8.7 Поточная диаграмма применения модели хроматической адаптации для вычисления трехстимульных значений согласованных цветовых стимулов.

Если учет изменений в условиях просмотра является единственным требованием той или иной промышленной отрасли, то модель хроматической адаптации — это простая альтернатива полной модели цветового восприятия.

Модели хроматической адаптации — это краеугольный камень всех моделей цветового восприятия, но при этом с моделями хроматической адаптации связаны некоторые неудобства, поскольку они не в состоянии обеспечить нас предикторами светлоты, насыщенности и цветового тона. Последние могут понадобиться в работе графических редакторов и программ гамут мэппинга (которым необходима более полная модель цветового восприятия).

8.6 ВЫЧИСЛЕНИЕ ЦВЕТОВОЙ КОНСТАНТНОСТИ

Существует еще один аспект исследований, направленных на создание математических моделей *вычисления цветовой константности,* и порой этот аспект тесно связан с моделями хроматической адаптации. Цель вычисления цветовой константности в том, чтобы на основании ограниченной цветовой информации, обычно представленной в виде набора трехстимульных значений, произвести оценку цветового постоянства объектов сцены. Фактически все сводится к попытке оценивать сигналы, зависящие только от спектрального коэффициента отражения объектов и не зависящие от освещения. С другой стороны, цель и смысл моделей хроматической адаптации в том, чтобы прогнозировать величину цветовой неконстантности, которую мы наблюдаем у людей.

Факт существования метамерных пар, которые в принципе не могут быть цветоконстантными и требуют учета осветителя в колориметрической практике, доказывает то, что в зрительной системе человека полная цветовая константность невозможна и нежелательна. Сказанное означает, что стремление получить как можно более цветоконстантную модель — это далеко не лучший путь моделирования функций зрительной системы человека. Однако в области машинного зрения использование максимально «цветоконстантных» датчиков могло бы оказаться весьма кстати.

Результаты вычислений цветовой константности дают нам ряд интересных данных и методик, которые могут помочь в моделировании человеческого зрения. К примеру, данные Мэлони и Ванделла (1986) демонстрируют пределы точности, с которой трихроматическая система в состоянии оценивать поверхностные коэффициенты отражения объектов реальной сцены. Д`Змура и Ленни (1986) показали, как трихроматическая зрительная система может давать цветоконстантные ответы по цветовому тону, жертвуя при этом константностью двух других атрибутов восприятия. Финлейсон и колл. (1994) демонстрируют получение оптимальных сенсорных спектральных чувствительностей, чтобы использовать правило фонкризовских коэффициентов для вычисления цветовой «околоконстантности».

Данные как перечисленных, так и многих других исследований дают представление о функциональных рамках зрительной системы, помогающее в проектировании, реализации и тестировании моделей цветового восприятия. Методы вычисления цветовой константности также дают окончательные ответы на вопросы, касающиеся требований, предъявляемых к оцифровке цветных изображений устройствами ввода (цифровыми камерами, сканерами и пр.), к синтезу реалистичных изображений средствами компьютерной графики, а также к конструкции колориметрического инструментария, предназначенного для работы с изображениями.

Брилль и Вест (1986) дают весьма полезный сравнительный анализ хроматической адаптации и цветовой константности.

9 МОДЕЛИ ХРОМАТИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ

Хроматическая адаптация — это одно из важнейших свойств зрительной системы человека, которое мы обязательно должны понять, поскольку оно имеет непосредственное отношение к моделированию цветового восприятия. В науке о зрении значение хроматической адаптации непреходяще, и по различным аспектам данной темы опубликовано множество работ.

В предыдущей главе были рассмотрены некоторые наиболее важные свойства и механизмы феномена адаптации, а также в ней была дана общая схема модели хроматической адаптации, прогнозирующий согласованные цветовые стимулы. В текущей главе детально описываются отдельные виды расчетов смены хроматической адаптации, но, конечно, все существующие модели, данные о которых когда-либо публиковались, описать невозможно. Поэтому мы рассмотрим лишь некоторые из этих моделей и опишем фундаментальные взаимоотношения между ними. Читатели, заинтересованные в углубленном исследовании вопроса, а также интересующиеся историческим аспектом моделей цветового восприятия могут обратиться к следующей литературе:

1. Ссылки, данные в 8-й главе (Бартлесон 1978, Терстиге 1972, Райт 1981, Ленни и Д`Змура 1988).
2. Ранняя история моделей хроматической адаптации: исследования Хельсона, Джадда и Варрена (1952), а также монография Вышецкого (1986), посвященная вопросам цветового восприятия в целом и хроматической адаптации в частности.
3. Классические работы по данной теме можно найти в сборнике, выпущенном под редакцией Мак-Адама (1993).

Отметим, что модели хроматической адаптации, описанные в текущей главе, хоть и позволяют вычислять согласованные цветовые стимулы, но при этом не являются моделями цветового восприятия, поскольку не оперируют предикторами его атрибутов, то есть величинами светлоты, насыщенности и цветового тона. В то же время, модели вполне пригодны для прогноза цветовых соответствий при изменении условий просмотра. Таким образом, модели хроматической адаптации — это серьезное расширение трехстимульной колориметрии, востребованное во многих областях науки и промышленности, и основа всех существующих сегодня моделей цветового восприятия.

Любая физиологически правдоподобная модель хроматической адаптации должна работать с сигналами, представляющими колбочковые ответы (или, по крайней мере, относительные колбочковые ответы). Таким образом, в приложениях, для которых критично использование CIE-трехстимульной колориметрии, прежде всего необходимо выполнить преобразование CIE-трехстимульных значений (XYZ) в колбочковые ответы (обозначаемые как LMS, RGB или $\rho\gamma\beta$ —

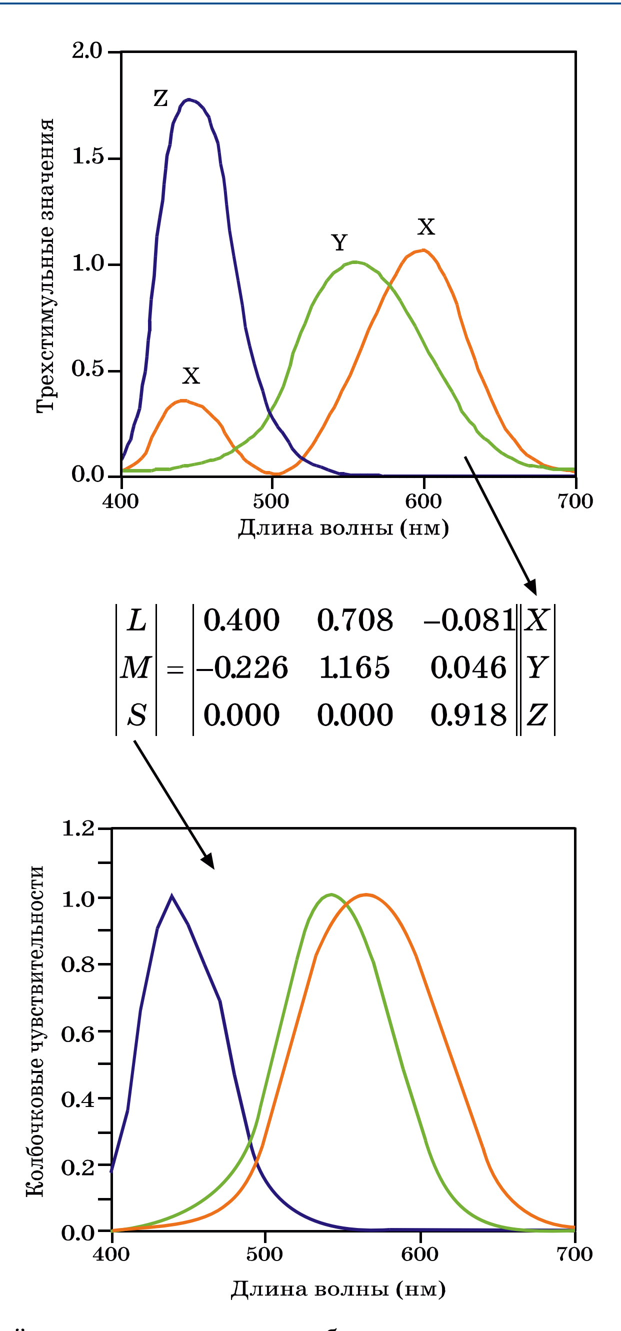


Рис. 9.1 Процесс линейного матричного преобразования трехстимульных значений *XYZ* в *LMS*-колбочковые чувствительности.

в зависимости от той или иной конкретной модели). К счастью, колбочковые ответы можно с высокой точностью рассчитать путем линейного преобразования CIE-трехстимульных значений. Пример такого преобразования показан на рис. 9.1. Данное преобразование (или подобное ему) типично для всех моделей хроматической адаптации и всех моделей цветового восприятия, совместимых с CIE-колориметрией, поэтому мы не будем подробно описывать его всякий раз, когда будем говорить о той или иной модели. Специфические преобразования, касающиеся эксклюзивных моделей, разумеется, будут обсуждаться отдельно.

9.1 МОДЕЛЬ ФОН КРИЗА

Все действующие современные модели хроматической адаптации концептуально и математически уходят корнями к идеям Иоганнеса фон Криза (1902). В свое время Фон Криз высказал ряд гипотез, которые сегодня переживают возрождение: ученый предложил простую модель хроматической адаптации, явившуюся отправной точкой для будущих исследований. Сам фон Криз от своих идей не ждал особого результата, о чем свидетельствует цитата из его работы от 1902 года (английский перевод Мак-Адама):

«Если когда-нибудь станет возможно объективным путем отделять друг от друга различные световые эффекты, то есть за счет непосредственного наблюдения за сетчаткой, то, наверное, потомки со снисходительной улыбкой вспомнят о наших усилиях и том долгом пути, на котором мы искали объяснение тем же самым явлениям».

Спустя более чем девяносто лет мы оглядываемся на работу фон Криза без всякой «снисходительной улыбки», более того, мы восхищаемся тем, как блестяще идеи фон Криза выдержали испытание временем.

На самом деле Фон Криз (1902) не предлагал специфического набора уравнений, который сегодня именуют «моделью фон Криза», «законом фонкризовской пропорциональности», «законом фонкризовских коэффициентов» и пр. Свои гипотезы он выразил лишь словесно:

«Можно полагать, что отдельные компоненты органа зрения полностью независимы друг от друга и каждый утомлен или адаптирован исключительно в рамках своей функции».

Принято считать, что идеи фон Криза — это распространение грассмановских законов аддитивного смешения цветовых стимулов на ситуацию перехода от одних условий просмотра к другим.

Современное толкование гипотез фон Криза в контексте моделей хроматической адаптации выражено уравнениями 9.1–9.3:

$$L_{\text{a}} = k_L L \tag{9.1}$$

$$M_{\text{a}} = k_M M \tag{9.2}$$

$$S_{\text{a}} = k_S S \tag{9.3}$$

где L, M и S — это исходные колбочковые ответы; k_L, k_M и k_S — коэффициенты шкалирования исходных колбочковых сигналов (то есть контроль усиления); L_{a}, M_{a} и S_{a} — постадаптационные колбочковые сигналы.

Уравнения 9.1–9.3 — это простая модель хроматической адаптации, основанная на том, что каждый из трех типов колбочек имеет персональный коэффициент контроля усиления.

Ключевым аспектом подобных моделей является получение специфических

значений k_L, k_M и k_S. В большинстве современных интерпретаций фонкризовской модели коэффициенты получены путем инверсии L-, M- и S-колбочковых ответов на белый (или максимально яркий) стимул данной сцены, что демонстрируют уравнения 9.4–9.6:

$$k_L = 1/L_{\text{на max}} \text{ или } k_L = 1/L_{\text{на белый}} \tag{9.4}$$

$$k_M = 1/M_{\text{на max}} \text{ или } k_M = 1/M_{\text{на белый}} \tag{9.5}$$

$$k_S = 1/S_{\text{на max}} \text{ или } k_S = 1/S_{\text{на белый}} \tag{9.6}$$

Уравнения 9.4–9.6 — это математическое представление фонкризовского тезиса о том, что «каждый утомлен или адаптирован исключительно в рамках своей функции». Вышеупомянутая интерпретация фонкризовских коэффициентов усиления может быть использована при вычислении согласованных цветовых стимулов для двух разных условий просмотра путем расчета постадаптационных сигналов для первых условий, последующей установки равенства с постадаптационными сигналами для вторых условий просмотра и финальной инверсии модели для вторых условий (формулы 9.7–9.9):

$$L_2 = (L_1 / L_{\text{на max1}})L_{\text{на max2}} \tag{9.7}$$

$$M_2 = (M_1 / M_{\text{на max1}})M_{\text{на max2}} \tag{9.8}$$

$$S_2 = (S_1 / S_{\text{на max1}})S_{\text{на max2}} \tag{9.9}$$

В ряде случаев модель хроматической адаптации удобнее выражать в виде матричных преобразований. Матричную интерпретацию фонкризовской модели демонстрирует уравнение 9.10:

$$\begin{vmatrix} L_\text{a} \\ M_\text{a} \\ S_\text{a} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1/L_{\text{на max}} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1/M_{\text{на max}} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1/S_{\text{на max}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} L \\ M \\ S \end{vmatrix} \tag{9.10}$$

В целях вычисления согласованных цветовых стимулов для двух разных условий просмотра матричное представление можно расширить путем включения в него преобразования CIE-трехстимульных значений XYZ в относительные колбочковые ответы LMS (**M**-матрица):

$$\begin{vmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{vmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{vmatrix} L_{\text{на max 2}} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & M_{\text{на max 2}} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & S_{\text{на max 2}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1/L_{\text{на max 1}} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1/M_{\text{на max 1}} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1/S_{\text{на max 1}} \end{vmatrix} \mathbf{M} \begin{vmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{vmatrix} \tag{9.11}$$

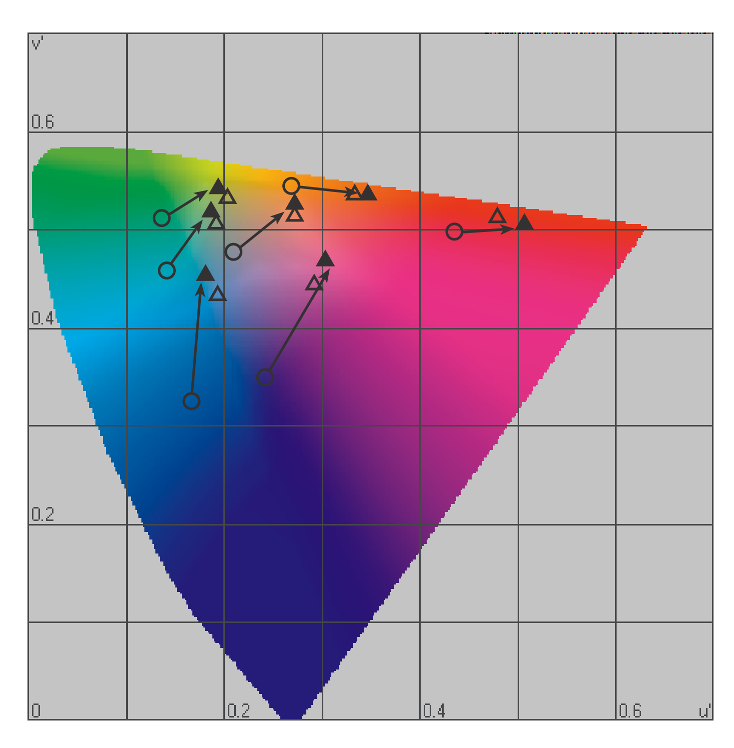


Рис. 9.2 Предикторы некоторых согласованных цветовых стимулов, полученные при помощи фонкризовской модели. Полые треугольнички представляют визуальные данные; сплошные треугольнички — предикторы модели.

Фонкризовский расчет смены хроматической адаптации при переходе от одних условий просмотра к другим использовался Бренеманом (1987) для прогнозирования визуальных данных его экспериментов (см. гл. 8). Результаты показаны на u`υ`-диаграмме цветностей (рис. 9.2): полые символы представляют данные о бренемановских согласованных цветовых стимулах, а сплошные символы — это данные, спрогнозированные фонкризовской моделью. Заметим, что прогнозы некоей идеальной модели были бы таковы, что сплошные треугольнички полностью совпали бы с полыми.

В нашем примере цветности стимулов при дневной адаптации (полые кружки на рис. 9.2) были использованы для прогноза координат цветности согласованных стимулов при адаптации по свету ламп накаливания (треугольнички). Из рис. 9.2 ясно, что фонкризовская гипотеза в целом верна и что ее современное выражение в виде матричного расчета согласованных стимулов при смене хроматической адаптации прогнозирует эти стимулы на удивление хорошо.

Хельсон, Джадд и Варрен (1952) в свое время опубликовали исследование, в котором согласованные цветовые стимулы были получены путем сравнения по памяти, и фонкризовская гипотеза тогда очень хорошо справилась со своей задачей. Примеры и анализ результатов сравнительно недавних экспериментов, посвященных преимуществам и ограничениям фонкризовской гипотезы, можно найти в работе Брайнарда и Ванделла (1992), а также Чичильницкого и Ванделла (1995).

В упомянутых экспериментах имеет место некоторое несоответствие между визуальными данными и предикторами фонкризовской модели — ученые пы-

тались решить возникшую проблему различными путями, которым будут посвящены следующие разделы данной главы, да и всей нашей книги в целом.

Удивительно, что фон Криз все это предвидел, и сразу же после тех строк, что нынче именуются фонкризовской моделью, читаем:

«Но если обратиться к реальной физиологии процессов, то начинаешь сомневаться в их простоте».

Действительно, все не так просто, но поразительно то, что незамысловатая гипотеза фон Криза объясняет большую часть феномена хроматической адаптации.

9.2 РЕТИНЕКСНАЯ ТЕОРИЯ

Механизмы хроматической адаптации, обсуждаемые в контексте цветовой константности, составляют суть т.н. ретинексной теории, разработанной Эдвином Лэндом и его коллегами (например, Лэнд и Мак-Канн, 1971; Лэнд 1977, 1986), которую можно рассматривать как расширенную версию фонкризовской модели. Было предложено несколько вариантов теории Лэнда, но ключевым моментом явилось непосредственное обращение ретинекс-алгоритма к пространственному распределению цветовых стимулов сложной сцены, дабы наилучшим образом моделировать ее восприятие.

Свою теорию Лэнд сформулировал для объяснения независимости цветового восприятия от спектрального распределения энергии отраженного света (трехстимульных значений). Лэнд предположил, что цветовое восприятие зависит от спектральных коэффициентов отражения поверхностей, а не от спектрального распределения отраженного света. Ретинекс-алгоритм в его наиболее поздней формулировке (Лэнд, 1986) весьма прост: ученый предложил три механизма спектральной чувствительности колбочковых фоторецепторов и назвал эти механизмы «ретинексами», о которых говорят как о некоей комбинации ретинальных и кортикальных механизмов. Лэнд выдвинул гипотезу, в которой в качестве размерностей пространства цветового восприятия предложил длинно-, средне- и коротковолновочувствительные ретинексы. Выходные ретинексы были определены через относительный сигнал от некоей данной точки сцены, нормированный на средний сигнал по данному ретинексу в данной сцене.

Наиболее интересной особенностью такого алгоритма является то, что он признает вариативность цветового ощущения при вариативности фона стимула. Влияние фона может меняться по мере изменения пространственного распределения ретинексных сигналов, использованных для нормировки сигнала от данной точки сцены. Если данный нормирующий сигнал — это средний сигнал по данному ретинексу, то ретинексный алгоритм редуцируется до стандартного фонкризовского расчета.

В физиологическом толковании ретинексной модели имеется ряд изъянов (Брайнард и Ванделл, 1986; Ленни и Д`Змура, 1988), но если нас более всего интересует результат, нежели стройность и физиологичность модели зрительной системы (которая заложена в большинство моделей цветового восприятия), то

концепции ретинексной теории могут оказаться весьма полезными, к примеру: сравнительно недавно ретинексные алгоритмы стали применять для компрессии динамического диапазона цифровых изображений и их цветокоррекции (Джобсон и колл., 1997). Прочие сферы применения, претензии и успехи ретинексной теории описаны Мак-Канном (1993).

Необходимость учета высшими моделями цветового восприятия пространственных размерностей в связке со спектральными — бесспорна, и концепции ретинексной теории дают нам некоторое понимание того, каким образом можно обеспечить такой учет. В процессе развития находятся и иные подходы к теории ретинексов (к примеру, Поирсон и Ванделл, 1993; Чанг и Ванделл, 1996), что готовит почву для дальнейшего развития моделей хроматической адаптации.

Таким образом, фонкризовская модель — это прочный фундамент моделей цветового восприятия, но для прогнозирования ряда феноменов адаптации он нуждается в некотором укреплении.

О пространственных моделях хроматической адаптации и моделях восприятия изображений мы будем подробно говорить в 20-й главе.

9.3 МОДЕЛЬ НАЯТАНИ

Одним из важных расширений фонкризовской гипотезы является нелинейная модель хроматической адаптации, разработанная научной командой Наятани. Данная модель была создана на основе т.н. фоновой колориметрии (расширение CIE-трехстимульной колориметрии), лежащей в сфере интересов светотехники. Исток модели — в исследованиях Мак-Адама (1961).

Модель Мак-Адама

В 1961 г. Мак-Адам описал нелинейную модель хроматической адаптации, в которой колбочковые ответы были выражены как некая постоянная в совокупности с коэффициентом усиления колбочкового возбуждения, растущим по некоей степенной зависимости. Данная модель представляет собой результат эмпирической подгонки данных о хроматической адаптации, ранее полученных Мак-Адамом (1956). Интересно, что Мак-Адаму потребовалась условная зрительная система с колбочками пяти типов, дабы истолковать экспериментальные данные в линейном виде (вероятно, так получилось потому, что Мак-Адам использовал технику ассиметричных соответствий, при которой две разных области сетчатки [левая и правая половины] экспонировались различными адаптирующими стимулами). Нелинейная модель Мак-Адама дает хорошее приближение к экспериментальным данным и является предшественником сегодняшних нелинейных моделей.

Модель Наятани

Нелинейная модель научной группы Наятани (1980, 1981) начинается с управления усилением, идущим по степенной функции с вариабельным значением степени. В этой модели фонкризовские коэффициенты пропорциональ-

ны максимумам длинно-, средне- и коротковолновых колбочковых ответов и степень функции зависит от фотометрической яркости адаптирующего поля. Напомним, что нелинейная функция была заявлена в классической работе Стивенсов (1963), посвященной субъективной яркости.

Другой интересной и важной особенностью нелинейной модели является добавка к колбочковым ответам понятия «шум», что позволяет моделировать пороговое поведение зрительной системы.

В общем виде модель выражается уравнениями 9.12–9.14:

$$L_a = a_L \left(\frac{L + L_n}{L_0 + L_n} \right)^{\beta_L} \quad (9.12)$$

$$M_a = a_M \left(\frac{M + M_n}{M_0 + M_n} \right)^{\beta_M} \quad (9.13)$$

$$S_a = a_S \left(\frac{S + S_n}{S_0 + S_n} \right)^{\beta_S} \quad (9.14)$$

где L_a, M_a и S_a — колбочковые сигналы после адаптации; L, M и S — колбочковые возбуждения; L_n, M_n и S_n — шум; L_0, M_0 и S_0 — колбочковые возбуждения по адаптирующему полю; β_L, β_M и β_S — степени монотонно растущих функций соответствующих колбочковых возбуждений по адаптирующему полю (конкретные величины степеней можно найти у Наятани [1982]); a_L, a_M и a_S — коэффициенты, заданные тем принципом, что точное цветовое постоянство немаркированного манселловского образца сохраняется, если его коэффициент яркости равен коэффициенту яркости адаптирующего фона.

Такахама (1984) расширил модель Наятани до уровня прогнозирования согласованных цветовых стимулов при фонах с различными коэффициентами яркости. Версия модели от 1987 г. (Наятани, 1987) была принята CIE в качестве пробной: предполагалось, что CIE, действуя через свои технические комитеты, соберет дополнительные данные для тестирования и возможного улучшения модели Наятани и решит вопрос о том, рекомендовать ли данную модель для общего пользования. Результаты тестирования оказались неубедительными, поэтому CIE не приняла модель в качестве кандидата на международный стандарт. Тонкости модели и ее полная формулировка были отработаны в испытательный период и подытожены в техническом отчете CIE (CIE 1994).

Нелинейная модель Наятани использовалась для прогнозирования бренемановских согласованных стимулов; результаты, аналогичные результатам фонкризовской модели (рис. 9.2), представлены на рис. 9.3: предикторы весьма хороши, но все же несколько менее точны, чем у простой фонкризовской модели (по тем же данным).

Одна из причин такой ситуации состоит в том, что бренемановские данные были собраны в таких условиях просмотра, при которых отсутствовал эффект когнитивного обесцвечивания осветителя, поэтому хроматическая адаптация была неполной и бренемановское адаптирующее поле, построенное на свете

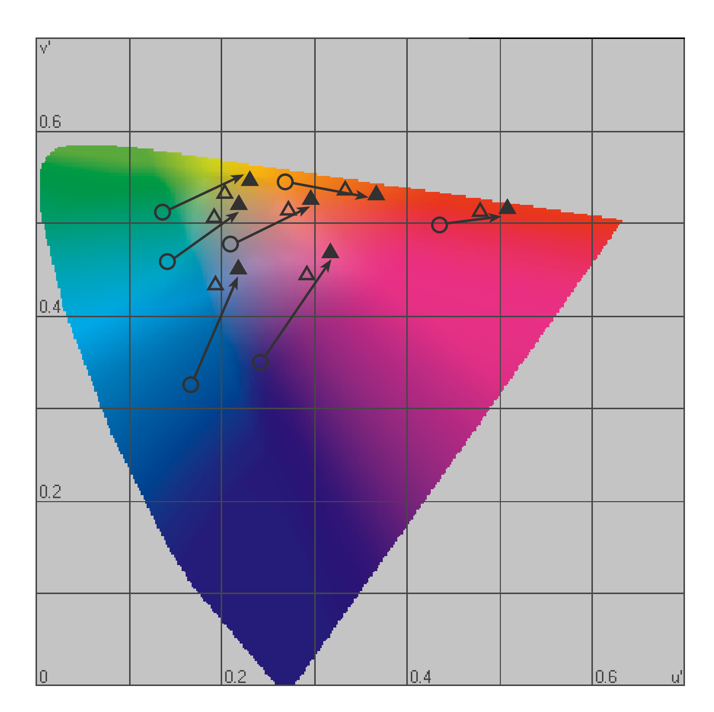


Рис. 9.3 Предикторы некоторых согласованных цветовых стимулов, полученные при помощи нелинейной модели Наятани. Полые треугольнички представляют визуальные данные; сплошные треугольнички — предикторы модели.

ламп накаливания, по ощущению оставалось желтоватым. В результате контрольные визуальные данные оказались сдвинутыми в желтую сторону относительно всех предикторов модели Наятани. Сравнительно недавно (Наятани, 1997) появились усовершенствованные методы определения и учета степени хроматической адаптации в научных экспериментах.

Нелинейная модель Наятани способна прогнозировать эффекты Ханта (рост полноты цвета по мере роста адаптирующей яркости), Стивенса (рост светлотного контраста по мере роста яркости) и Хельсона — Джадда (появление цветового тона у немаркированных манселловских образцов при резкохроматичном освещении). Стоит отметить, что фонкризовский расчет смены хроматической адаптации не зависит от яркости и, таким образом, не может быть использован для прогноза тех феноменов восприятия, которые являются функцией от нее. Плюс к тому, линейный характер простого фонкризовского расчета препятствует прогнозу эффекта Хельсона — Джадда.

Модель Наятани интересна по ряду причин. Она весьма простым путем совершенствует фонкризовскую гипотезу, поднимая ее на уровень, при котором модель становится способной к прогнозу некоторых дополнительных эффектов. Также модель Наятани оказала серьезное влияние на работу CIE в области моделирования хроматической адаптации и цветового восприятия в целом, что заложило базис одной из двух существующих сегодня полноценных моделей цветового восприятия[1].

---

1 Здесь автор намекает на модели CIECAM97s и CIECAM02, утвержденные CIE. — *Прим. пер.*

Полная модель цветового восприятия, разработанная Наятани, описана в 11-й главе.

9.4 МОДЕЛЬ ГУТА

В науке о зрении (но не в колориметрии) популярна одна из вариаций модели Наятани — модель, описанная Гутом (1991, 1995).

Гутовская модель не имеет прямого отношения к трехстимульной колориметрии CIE, поскольку колбочковые чувствительности не представлены в виде линейной трансформации CIE-функций цветового соответствия. Последнее создает определенные трудности в реализации модели. В прикладном плане было бы разумно (и, конечно, очень полезно в плане прогнозов) поступить иначе: использовать набор колбочковых чувствительностей, получаемых непосредственно из трехстимульных значений CIE, но при этом с добавкой гутовской формулировки.

Гутовская модель — это фрагмент зрительной модели ATD (см. гл. 14), созданной в результате многолетних усилий по согласованию прогнозов с данными визуальных экспериментов. Большинство этих экспериментов вместо шкалирования по размерностям цветового восприятия (см. гл. 4) основаны на классической пороговой психофизике.

В общем виде гутовская модель хроматической адаптации дана в уравнениях 9.15–9.20:

$$L_{\mathrm{a}} = L_r[1-(L_{r0}/(\sigma+L_{r0}))] \tag{9.15}$$

$$L_r = 0.66L^{0.7} + 0.002 \tag{9.16}$$

$$M_{\mathrm{a}} = M_r[1-(M_{r0}/(\sigma+M_{r0}))] \tag{9.17}$$

$$M_r = 1.0M^{0.7} + 0.003 \tag{9.18}$$

$$S_{\mathrm{a}} = S_r[1-(S_{r0}/(\sigma+S_{r0}))] \tag{9.19}$$

$$S_r = 0.45S^{0.7} + 0.00135 \tag{9.20}$$

где L_{a}, M_{a} и S_{a} — колбочковые сигналы после адаптации; L, M и S — колбочковые возбуждения; L_{r0}, M_{r0} и S_{r0} — колбочковые возбуждения по адаптирующему полю после нелинейной компрессии; σ — некая постоянная (номинально равная 300), о которой обычно говорят как о шумовом факторе. Важно отметить также, что колбочковые ответы в данной модели должны быть выражены в абсолютных единицах, поскольку уровень фотометрической яркости никак не учитывается.

Взаимоотношения гутовской модели с фонкризовской можно выразить с помощью некоей математической манипуляции: если проигнорировать изна-

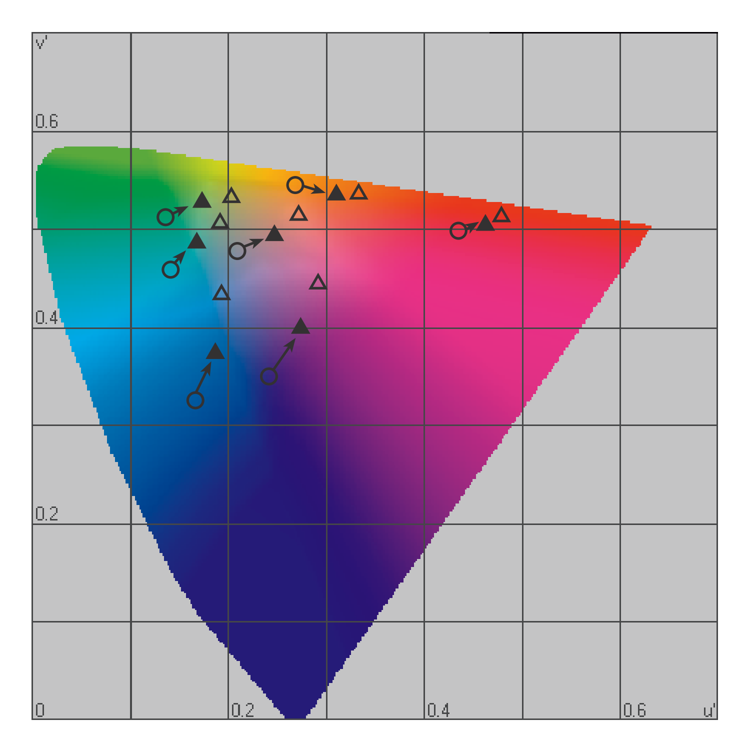


Рис. 9.4 Предикторы некоторых согласованных цветовых стимулов, полученные с помощью модели Гута. Полые треугольнички представляют визуальные данные; сплошные треугольнички — предикторы модели.

чальную нелинейность, фонкризовский коэффициент усиления для гутовской модели может быть выведен из уравнения 9.15 по формуле 9.21:

$$k_L = 1 - (L_{r0} / (\sigma + L_{r0})) \quad (9.21)$$

Взаимоотношения гутовской модели с традиционными фонкризовскими коэффициентами становятся понятными, если выполнить алгебраическую замену согласно уравнениям 9.22–9.24:

$$k_L = (\sigma + L_{r0}) / (\sigma + L_{r0}) - L_{r0} / (\sigma + L_{r0}) \quad (9.22)$$

$$k_L = (\sigma + L_{r0} - L_{r0}) / (\sigma + L_{r0}) \quad (9.23)$$

$$k_L = \sigma / (\sigma + L_{r0}) \quad (9.24)$$

Собственно говоря, разница между моделями заключена в «σ», о которой, напомним, говорят как о шумовом факторе, играющем важную роль при малых интенсивностях стимулов и не столь значимом при больших. Таким образом, если уровень яркости растет, модель Гута все более и более походит на номинальную фонкризовскую модель.

На рис. 9.4 показаны бренемановские согласованные цветовые стимулы (вы-

числения предикторов были выполнены по номинальной, открыто опубликованной гутовской модели): мы видим, что имеет место систематический разброс между визуальными данными и их предикторами. Данный разброс можно отследить по σ-параметру: с одной стороны, мы знаем, что бренемановские данные великолепно прогнозируются простой фонкризовской моделью; с другой стороны, при уменьшении σ-параметра предикторы гутовской модели улучшаются, следовательно, мы можем говорить об определенной ущербности модели Гута.

В то же время, в качестве структуры общей зрительной модели, гутовская модель вполне способна к удовлетворительному прогнозированию визуальных данных, однако для разных условий просмотра и разных визуальных экспериментов она зачастую требует малых значений в управлении своими параметрами, что вполне пригодно при попытках прогнозирования различных феноменов зрительного восприятия, но совершенно непрактично в большинстве прикладных сфер, таких, как репродуцирование на разных носителях (где конечные условия просмотра зачастую неизвестны и поэтому нет никакой возможности выполнить серию итераций). Таким образом, для использования гутовской модели адаптации (а также полной ATD-модели, описанной в 14-й главе) в прикладных сферах потребуются определенные разъяснения.

9.5 МОДЕЛЬ ФЕРШИЛЬДА

Бренемановские результаты, демонстрирующие неполноту хроматической адаптации, подтолкнули исследователей к проведению серии экспериментов (Фершильд, 1990), целью которых было выявление степени хроматической адаптации к стимулам различных видов. Данная работа привела к очередной модификации фонкризовской гипотезы, которая обрела способность прогнозировать степень адаптации, основываясь непосредственно на адаптирующем стимуле (Фершильд, 1991).

Данная модель, подобно модели Наятани, полностью совместима с CIE-колориметрией, но ориентирована скорее на науку об изображениях, нежели на светотехнику. Модель сконструирована так, чтобы, с одной стороны, быть простой в обращении, а с другой — включать в себя и когнитивное обесцвечивание осветителя, и эффект Ханта, и неполноту хроматической адаптации.

Яснее всего модель формулируется в виде серии матричных преобразований.

Первый шаг — это преобразование CIE-трехстимульных значений XYZ в фундаментальные трехстимульные значения LMS для первых условий просмотра, что показано в уравнениях 9.25–9.26 (преобразование Ханта — Поинтера — Эстевец с нормировкой на D65-осветитель):

$$\begin{vmatrix} L_1 \\ M_1 \\ S_1 \end{vmatrix} = \mathbf{M} \begin{vmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{vmatrix} \quad (9.25)$$

$$\mathbf{M} = \begin{vmatrix} 0.4002 & 0.7076 & -0.0808 \\ -0.2263 & 1.1653 & 0.0457 \\ 0.0 & 0.0 & 0.9182 \end{vmatrix} \quad (9.26)$$

Следующий шаг — применение *модифицированного* фонкризовского расчета смены хроматической адаптации, учитывающего неполноту последней (уравнения 9.27–9.31):

$$\begin{vmatrix} L_1' \\ M_1' \\ S_1' \end{vmatrix} = \mathbf{A} \begin{vmatrix} L_1 \\ M_1 \\ S_1 \end{vmatrix} \quad (9.27)$$

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} a_L & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & a_M & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & a_S \end{vmatrix} \quad (9.28)$$

$$a_M = \frac{p_M}{M_n} \quad (9.29)$$

$$p_M = \frac{(1 + Y_n^{\upsilon} + m_E)}{(1 + Y_n^{\upsilon} + 1/m_E)} \quad (9.30)$$

$$m_E = \frac{3(M_n / M_E)}{L_n / L_E + M_n / M_E + S_n / S_E} \quad (9.31)$$

где Y_n — это фотометрическая яркость адаптирующего стимула в cd/m^2 (подстрочные индексы n относятся к адаптирующему стимулу, а подстрочные индексы E — к равноэнергетическому осветителю); степень υ равна 1/3.

Переменные p и a для коротко- (S) и длинно- (L) волновых колбочковых чувствительностей рассчитываются аналогичным образом.

Уравнения неполной хроматической адаптации основаны на аналогичных уравнениях хантовской модели цветового восприятия (Хант, 1991), которая подробно описана в гл. 12. (Хант никогда не публиковал схему расчета смены хроматической адаптации вне контекста своей модели цветового восприятия, поэтому хантовская модель всегда рассматривается целиком [см. гл. 12]).

Переменные a — это модифицированные фонкризовские коэффициенты; переменные p представляют долю от полной фонкризовской адаптации и, когда адаптация неполна, не равны единице; p-значения зависят от яркости адаптирующего стимула и его цвета: если яркость растет — степень полноты адаптации выше, если цветность адаптирующего стимула удаляется от нормальной точки (равноэнергетический осветитель) — степень адаптации снижается. Ко-

гда происходит когнитивное обесцвечивание осветителя, переменные p_L, p_M и p_S равны единице.

Уравнения 9.30 и 9.31 реализуют данный механизм внутри модели, и выдаваемые им предикторы вполне адекватны визуальным экспериментальным данным (Хант и Виннер, 1975; Бренеман, 1987; Фершильд, 1992).

Завершающим шагом в вычислении постадаптационных сигналов является преобразование, которое по уравнениям 9.32–9.34 позволяет рассчитать яркостно-зависимое взаимодействие между колбочками трех типов:

$$\begin{vmatrix} L_a \\ M_a \\ S_a \end{vmatrix} = \mathbf{C}_1 \begin{vmatrix} L_1' \\ M_1' \\ S_1' \end{vmatrix} \quad (9.32)$$

$$\mathbf{C} = \begin{vmatrix} 1.0 & c & c \\ c & 1.0 & c \\ c & c & 1.0 \end{vmatrix} \quad (9.33)$$

$$c = 0.219 - 0.0784 \log_{10}(Y_n) \quad (9.34)$$

Переменная c, известная как «цепная модель», взята из работы Такахамы (1977). В этой модели, от которой в дальнейшем Такахама отказался, отдав предпочтение нелинейной модели (Наятани, 1981), переменные взаимодействия были введены для прогнозирования яркостно-зависимых эффектов. С той же целью С-матрица была включена и в модель Фершильда.

Для определения цветностей согласованных стимулов по вторым адаптирующим условиям, для них должны быть получены матрицы «А» и «С», затем инвертированы и применены согласно уравнениям 9.35–9.37:

$$\begin{vmatrix} L_2' \\ M_2' \\ S_2' \end{vmatrix} = \mathbf{C}_2^{-1} \begin{vmatrix} L_a \\ M_a \\ S_a \end{vmatrix} \quad (9.35)$$

$$\begin{vmatrix} L_2 \\ M_2 \\ S_2 \end{vmatrix} = \mathbf{A}_2^{-1} \begin{vmatrix} L_2' \\ M_2' \\ S_2' \end{vmatrix} \quad (9.36)$$

$$\begin{vmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{vmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{vmatrix} L_2 \\ M_2 \\ S_2 \end{vmatrix} \quad (9.37)$$

Результирующую модель можно выразить в виде отдельного матричного уравнения (9.38):

$$\begin{vmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{vmatrix} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}_2^{-1}\mathbf{C}_2^{-1}\mathbf{C}_1\mathbf{A}_1\mathbf{M}\begin{vmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{vmatrix} \tag{9.38}$$

Дальнейшие эксперименты (к примеру, Пиротта и Фершильд, 1995) показали, что **C**-матрица создавала дополнительную нежелательную зависимость от яркости, что приводило к общему сдвигу светлоты. Данный сдвиг не оказывал влияния на качество репродуцирования изображений, поскольку сдвигалось все изображение целиком. Однако матрица вводила серьезную систематическую ошибку в предикторы цветов простых объектов[1]. В итоге модель была пересмотрена (Фершильд, 1994) и **C**-матрица исключена из нее. Прогнозы по простым цветам улучшились, а на изображения удаление матрицы не оказало влияния. Правда, при этом модель перестала прогнозировать эффект Ханта, но в работе с изображениями такая потеря некритична, поскольку в этом случае любым прогнозам хантовского эффекта всегда противостоит гамут мэппинг.

Данные изменения, наряду с некоторыми упрощениями в уравнениях (различные нормировки), были объединены и заложены в основу последней версии RLAB-модели цветового восприятия, описанной в 13-й главе (Фершильд, 1996).

На рис. 9.5 показаны предикторы бренемановских согласованных цветовых стимулов, выполненные по фершильдовской модели смены хроматической адаптации. Предикторы, выдаваемые обеими вышеописанными версиями модели (оригинальной и упрощенной), идентичны и не менее (если не более) хороши, чем предикторы всех описанных выше моделей. Количественный анализ всех бренемановских данных подтверждает этот результат (Фершильд, 1991).

9.6 СЕМЕЙСТВО CAT-МОДЕЛЕЙ

В 1998 г. CIE приняла модель цветового восприятия CIECAM97s (описана в гл. 15), которая задействует модифицированный вариант расчета смены хроматической адаптации, известный как «Брэдфорское преобразование». По сути Брэдфордская трансформация — это фонкризовский расчет плюс дополнительная степенная нелинейность по синему каналу плюс *оптимизированные колбочковые чувствительности*. Нелинейность по синему каналу создает ряд практических проблем в плане инверсии CIECAM97s-модели, поэтому акцент был сделан на простых, линейных, расчетах смены хроматической адаптации (CAT), построенных путем оптимизации матричного преобразования *XYZ* в *RGB*-значения, выполняемого *до* фонкризовской нормировки.

Фершильд (2001) опубликовал обзор линейных CAT, предназначенных для пересмотра CIECAM97s и перехода к CIECAM02 (см. гл. 16): для получения оптимальной матрицы в расчетах были задействованы различные методики, но

---

[1] Имеются в виду единичные (изолированные) цветовые стимулы. — *Прим. пер.*

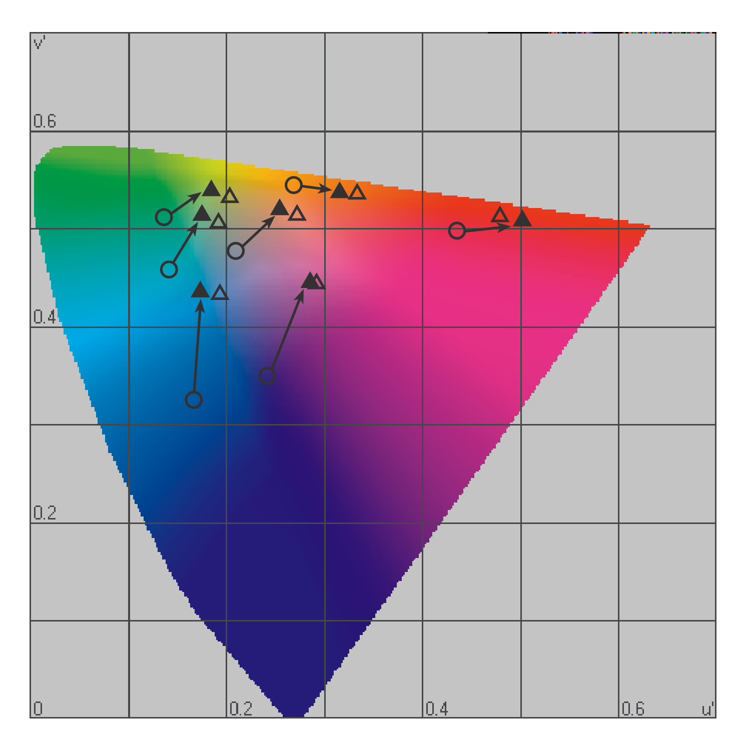


Рис. 9.5 Предикторы некоторых согласованных цветовых стимулов, полученные с помощью модели Фершильда (1991). Полые треугольнички представляют визуальные данные; сплошные треугольнички — предикторы модели.

все они давали несколько разные предикторы и у каждой были свои преимущества и недостатки. Однако оптимальная схема линейного матричного преобразования все же была найдена, и результаты (по всем доступным данным) оказались так же хороши, что и у нелинейной CAT, включенной в CIECAM97s. Столь удачный исход привел к созданию и утверждению техническим комитетом CIE (CIE TC8-01) модели цветового восприятия CIECAM02, использующей линейную CAT.

Решение TC8-01 принять к использованию линейную CAT было принято легко — куда более трудным оказался выбор оптимального матричного преобразования. Матрицы-кандидаты были весьма схожи друг с другом, и их расчетные чувствительности (по сравнению с истинными колбочковыми чувствительностями) получились с более острыми пиками, а сами пики оказались сильнее разнесены по спектру — но при этом в них появились отрицательные значения. Физиологическая достоверность простого фонкризовского расчета при такой оптимизации оказалась под большим вопросом, но зато модели смогли с большей точностью прогнозировать соответствия, приняв весь объединенный механизм адаптации зрительной системы человека за «черный ящик».

Предикторы, рассчитанные по фонкризовской модели с использованием «заостренных» чувствительностей, имели тенденцию к большей цветовой константности, нежели предикторы, полученные с использованием истинных колбочковых чувствительностей. Прогноз, выполненный на основе повышенной цветовой константности, призван имитировать результат работы высокоуровневых механизмов адаптации.

Калабрия и Фершильд (2001) выполнили практическое сравнение предложенных линейных CAT. Результаты показали, что отличия между изображениями, обсчитанными по разным оптимизированным матрицам, крайне малы и для практических сфер абсолютно несущественны. Серьезные отличия давала лишь линейная CAT, построенная на истинных колбочковых чувствительностях. Таким образом, работа Калабрии и Фершильда (2001) продемонстрировала то, что использование оптимизированных (заостренных) колбочковых чувствительностей предпочтительнее использования истинных. Данный тезис подтвердила серия экспериментов, выполненных TC8-01 с использованием различных данных по согласованным цветовым стимулам. Поскольку различные оптимизированные матрицы в прикладном плане были идентичными, TC8-01 нашел дополнительные критерии, чтобы наконец выбрать преобразование, используемое теперь в CIECAM02 и известное как CAT02.

9.7 CAT02

Как было сказано выше, TC8-01 Международной комиссии по освещению (CIE, 2004) выбрал линейную CAT, основанную на матрице, оптимизированной к широкому диапазону согласованных цветовых стимулов и поддерживающей приблизительную совместимость с нелинейным CIECAM97s-преобразованием. Расчет смены хроматической адаптации, описываемый таким способом, известен как CAT02 и показан в уравнениях 9.39 и 9.40.

$$\begin{vmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{vmatrix} = \mathbf{M}_{\text{CAT02}}^{-1} \begin{vmatrix} R_{\text{адапт 2}} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & G_{\text{адапт 2}} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & B_{\text{адапт 2}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1/R_{\text{адапт 1}} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1/G_{\text{адапт 1}} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1/B_{\text{адапт 1}} \end{vmatrix} \mathbf{M}_{\text{CAT02}} \begin{vmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{vmatrix} \quad (9.39)$$

$$\mathbf{M}_{\text{CAT02}} = \begin{vmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{vmatrix} \quad (9.40)$$

В целом процесс представляет собой фонкризовский расчет, но с тем отличием, что конверсия производится из CIE-трехстимульных значений XYZ в «заостренные» колбочковые чувствительности (RGB) по $\mathbf{M}_{\text{CAT02}}$-матрице. Затем RGB-значения делятся на адаптированные RGB-значения для первых условий просмотра и умножаются на адаптированные RGB-значения для вторых условий просмотра. После чего выполняется обратное линейное преобразование к согласованным CIE-трехстимульным значениям.

По рис. 9.6 хорошо видно, что спектральные чувствительности, представленные $\mathbf{M}_{\text{CAT02}}$, отличны от колбочковых чувствительностей Ханта — Поинте-

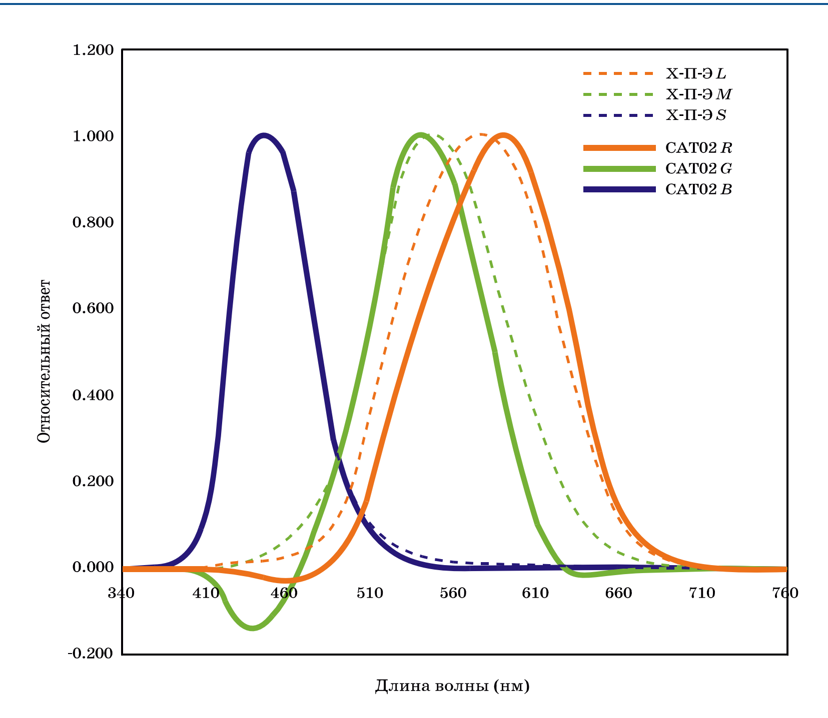


Рис. 9.6 Сравнение колбочковых чувствительностей Ханта — Поинтера — Эстевец (пунктирные линии, маркированные как «Х-П-Э») с «заостренными» колбочковыми чувствительностями, использованными в CAT02 (сплошные линии, маркированные «CAT02»). Обратите внимание на то, что модифицированные чувствительности спектрально-самостоятельнее, острее и содержат отрицательные значения.

ра — Эстевец, используемых во многих моделях хроматической адаптации и моделях цветового восприятия.

И наконец, следует отметить то, что уравнения 9.39 и 9.40, исходя из тезиса о полной хроматической адаптации, представляют CAT02 в его самой простой форме. Простейшие расширения CAT02 до преобразования, позволяющего строить предикторы при неполной хроматической адаптации и когнитивном обесцвечивании осветителя, представлены в полном описании CIECAM02 (глава 16).

10 МОДЕЛИ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

Различные виды расчета смены хроматической адаптации, обсуждавшиеся в главе 9, поднимают трехстимульную колориметрию на уровень прогнозирования цветовых ощущений. Однако ее возможности по-прежнему остаются ограниченными, поскольку CAT предсказывают лишь цветовые соответствия для разных условий просмотра (то есть согласованные цветовые стимулы). Для описания фактического цветового восприятия стимула недостаточно одного лишь расчета смены хроматической адаптации — нужно задействовать параметры цветового восприятия, описанные в 4-й главе, а именно: субъективную яркость, полноту цвета и цветовой тон (абсолютные атрибуты) или светлоту, насыщенность, чистоту цвета и вновь цветовой тон (относительные атрибуты). Напомним, что перечисленные понятия позволяют полностью описать цветовое восприятие стимула, но расчеты смены хроматической адаптации сами по себе не могут дать величин, коррелирующих с данными перцепционными атрибутами, поэтому для решения поставленной задачи нам необходимы *модели цветового восприятия*.

10.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

Мир цветовых измерений полон всевозможных описаний цвета: трехстимульных значений, координат цветности, равномерных шкал цветности, равномерных цветовых пространств, а также ординарных (just plain-old) цветовых пространств. Порой очень сложно разобраться во всех этих системах и тем более в отличиях между ними. Чем же, помимо всех перечисленных вариантов цветовой спецификации, определяется модель цветового восприятия?

Перед Техническим комитетом Международной комиссии по освещению (CIE), именуемым «*Комитет по тестированию моделей цветового восприятия*», была поставлена задача оценки качества различных моделей цветового восприятия и выбора оптимальной модели, пригодной к общему употреблению. Таким образом, наипервейшая задача комитета состояла в том, чтобы дать определение того, что же именно должно испытываться, то есть — дать определение модели цветового восприятия (Фершильд, 1995).

Моделям цветового восприятия TC1-34 дал следующее определение:

⇨ *Модель цветового восприятия* — это некая модель, выдающая предикторы по меньшей мере относительного цветового ощущения, то есть: светлоту, насыщенность и цветовой тон.

Для того, чтобы модель была способна выдавать полноценные предикторы, она должна содержать какой-либо вариант расчета смены хроматической адап-

тации. Для включения дополнительных предикторов (субъективная яркость и полнота цвета) или моделирования яркостно-зависимых эффектов (таких, как эффекты Стивенса и Ханта) модель должна быть усложнена.

На основании данного определения некоторые примитивные цветовые пространства, такие, как CIE 1976 $L^*a^*b^*$ (CIELAB) и CIE 1976 $L^*u^*\upsilon^*$ (CIELUV), можно толковать как модели цветового восприятия, поскольку эти цветовые пространства содержат простые схемы расчета хроматической адаптации, а также предикторы светлоты, насыщенности и цветового тона.

Ниже мы обсудим общую структуру моделей цветового восприятия, а в качестве отдельного примера — систему CIELAB.

10.2 СТРУКТУРА МОДЕЛЕЙ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

В текущем разделе будут сформулированы общие концепции, применимые к структуре всех моделей цветового восприятия.

Модели цветового восприятия, используемые в прикладных областях, начинаются с трехстимульной спецификации стимула (CIE *XYZ*) и условий просмотра (для некоторых моделей вместе с точными абсолютными яркостями). Первым делом трехстимульные значения подвергаются линейному преобразованию в колбочковые ответы, дабы как можно точнее смоделировать процессы, происходящие в зрительной системе человека.

С трехстимульных значений мы начинаем из сугубо практических соображений, поскольку существует множество измерительных приборов, позволяющих быстро и точно описать стимул трехстимульными значениями CIE (система CIE, напомним, является общеизвестным международным стандартом в сферах цветоспецификации и цветокоммуникации).

Иногда модели цветового зрения и цветового восприятия, используемые в науке о зрении, базируются на колбочковых чувствительностях, не являющихся линейным производным функций цветового соответствия CIE (к примеру, Гут, 1995), но скромные преимущества этих моделей сводятся на нет их непрактичностью.

Помимо *XYZ*-значений самого стимула для прогнозирования цветового восприятия необходим учет данных об условиях просмотра, что подтверждают все феномены восприятия, описанные в главах 6 и 7. Как минимум, необходимы трехстимульные значения адаптирующего стимула (как правило — это источник освещения). Плюс к тому, может учитываться ряд дополнительных данных, таких, как абсолютный уровень фотометрической яркости стимула, колориметрические координаты проксимального поля, фона и окружения, а также, возможно, иная информация пространственного и временного характера.

Независимо от того, будем ли мы учитывать все описанные выше параметры или только их часть, первый шаг к созданию модели цветового восприятия — это выбор того или иного варианта расчета смены хроматической адаптации (см. гл. 9). За ним следует объединение постадаптационных сигналов с сигналами высокого уровня (как правило, моделируемых как постоппонентные сигналы), включающими в себя пороги и/или нелинейные компрессии. На финаль-

ном этапе результирующие сигналы разными способами объединяются с целью получения собственно предикторов различных атрибутов восприятия. Данные об адаптирующем стимуле, фоне, окружении и пр. включаются в модель на этапе преобразования хроматической адаптации, а если необходимо, то и на более поздних этапах.

По описанной схеме построены все модели цветового восприятия, рассматриваемые в данной книге, однако подход к каждой из них индивидуален и акценты расставлены по-разному. Простейшим примером модели цветового восприятия, построенной в соответствии с описанными выше шагами, является цветовое пространство CIELAB, интерпретация которого как модели цветового восприятия дана в следующем разделе.

10.3 CIELAB

Тот, кто воспитан на классической традиционной колориметрии, как правило, морщится, когда слышит о CIELAB как о модели цветового восприятия: в самом деле, CIE (1986) прошла долгий путь, прежде чем назвала LAB равномерным цветовым пространством (но не пространством восприятия). Изначально CIELAB создавалось как пространство спецификации цветовых отличий: в начале семидесятых для расчета цветовых отличий предлагалось ни много ни мало — 20 различных формул, и дабы обеспечить равномерность на тот период, пока создается наилучшая формула, в 1976 г. CIE рекомендовала два цветовых пространства: CIELAB и CIELUV (Робертсон 1977, 1990). Эвклидово расстояние между двумя точками в этих пространствах являлось мерой цветового отличия (ΔE^*_{ab} или ΔE^*_{uv}).

В 1994 г. для измерения цветовых отличий CIE рекомендовала единую формулу, основанную на CIELAB-пространстве и известную как ΔE^*_{94} (Бернс, 1993; CIE, 1995). В процессе создания формулы ΔE^*_{94} комиссия вознамерилась создать новое цветовое пространство с некоторыми предикторами атрибутов цветового восприятия.

Неудивительно, что наилучший путь описания цветовых отличий между двумя стимулами — это описание цветового восприятия каждого. Таким образом, с некоторой осторожностью CIELAB все же можно рассматривать именно как модель цветового восприятия.

Вычисление CIELAB-координат

Вычисление CIELAB-координат необходимо начинать с получения трехстимульных значений самоего стимула (XYZ) и трехстимульных значений эталонного белого ($X_nY_nZ_n$). Эти данные используются в «модифицированном» фон-кризовском расчете смены хроматической адаптации: трехстимульные значения стимула нормируются на трехстимульные значения эталонного белого (то есть: X/X_n, Y/Y_n и Z/Z_n). Отметим, что CIE-трехстимульные значения при этом не преобразовываются в колбочковые ответы, как того требует истинная фон-кризовская модель адаптации.

Затем «адаптированные» сигналы подвергаются нелинейной компрессии по

корнекубическим формулам CIELAB: компрессия моделирует нелинейные взаимоотношения между физически измеряемой энергией и перцепционным ответом (Стивенс, 1961).

Далее, согласно оппонентной теории цветового зрения, сигналы объединяются по трем размерностям: светлота-темнота, краснота-зелень и желтизна-синева.

Финальная операция: внедрение в уравнения дополнительных мультипликативных констант, для обеспечения требуемой равномерности перцепционного пространства и надлежащих взаимоотношений между тремя размерностями.

Полные CIELAB-уравнения даны в формулах 10.1–10.4:

$$L^* = 116 f(Y / Y_n) - 16 \tag{10.1}$$

$$a^* = 500[f(X / X_n) - f(Y / Y_n)] \tag{10.2}$$

$$b^* = 200[f(Y / Y_n) - f(Z / Z_n)] \tag{10.3}$$

$$f(\omega) = \begin{cases} (\omega)^{1/3} & \omega > 0.008856 \\ 7.787(\omega) + 16/116 & \omega \le 0.008856 \end{cases} \tag{10.4}$$

Для того чтобы преодолеть ограничения оригинальных CIELAB-уравнений (которые действуют только при условии, что X/X_n, Y/Y_n и $Z/Z_n > 0.01$), Паули (1976) ввел дополнительные формулы[1]. Малые значения в реальной практике встречаются редко, но иногда они появляются в безбликовых спецификациях систем визуализации изображений, то есть полный набор формул 10.1–10.14 критичен для тех случаев, когда могут появиться малые значения.

L^* из уравнения 10.1 — это величина, коррелирующая (*коррелят*) с перцепционным понятием «светлота», лежащая в диапазоне от 0.0 (черный) до 100.0 (диффузный белый), но иногда (при наличии бликов в изображении) величина L^* может превышать 100. Размерности a^* и b^* — коррелируют примерно с красно-зеленым и желто-синим восприятием насыщенности, которые могут иметь как положительные, так и отрицательные значения. У ахроматичных стимулов (то есть белого, серого, черного) значения по a^* и b^* равны 0.0. Максимальные значения по осям a^* и b^* ограничены скорее физическими свойствами материалов, нежели собственно формулами.

С целью создания трехмерного цветового пространства, размерности L^*, a^* и b^* CIELAB объединены с декартовыми координатами (см. рис. 10.1), однако CIELAB можно представить и в виде цилиндрических координат (рис. 10.2). Цилиндрическая координатная система дает предикторы насыщенности — C^*_{ab} и цветового тона — h_{ab} (угловые градусы цветового тона), вычисляемые по формулам 10.5 и 10.6:

[1] Уравнение 10.4. — *Прим. пер.*

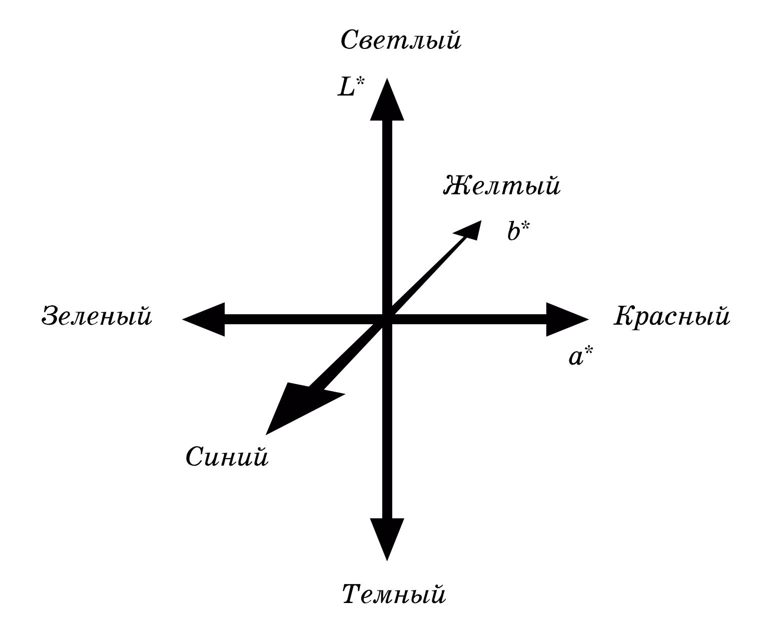


Рис. 10.1 Декартово представление пространства CIELAB.

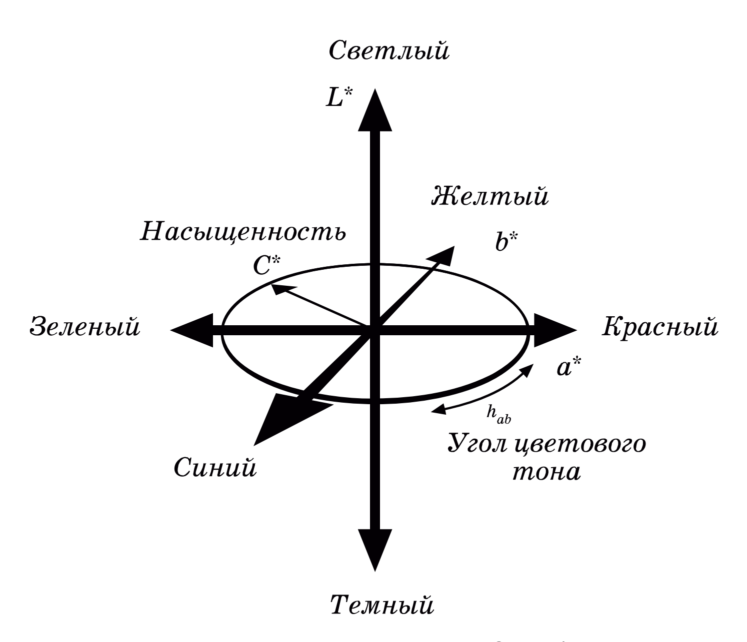


Рис. 10.2 Цилиндрическое представление пространства CIELAB.

$$C^*_{ab} = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \qquad (10.5)$$

$$h_{ab} = \tan^{-1}(b^* / a^*) \qquad (10.6)$$

У C^*_{ab} те же единицы, что и у a^* и b^*: C^*_{ab} -значение ахроматических стимулов равно 0.0 (то есть, насыщенности нет). Угол цветового тона (h_{ab}) выражается положительными значениями (0 лежит на положительной a^*-оси), которые рас-

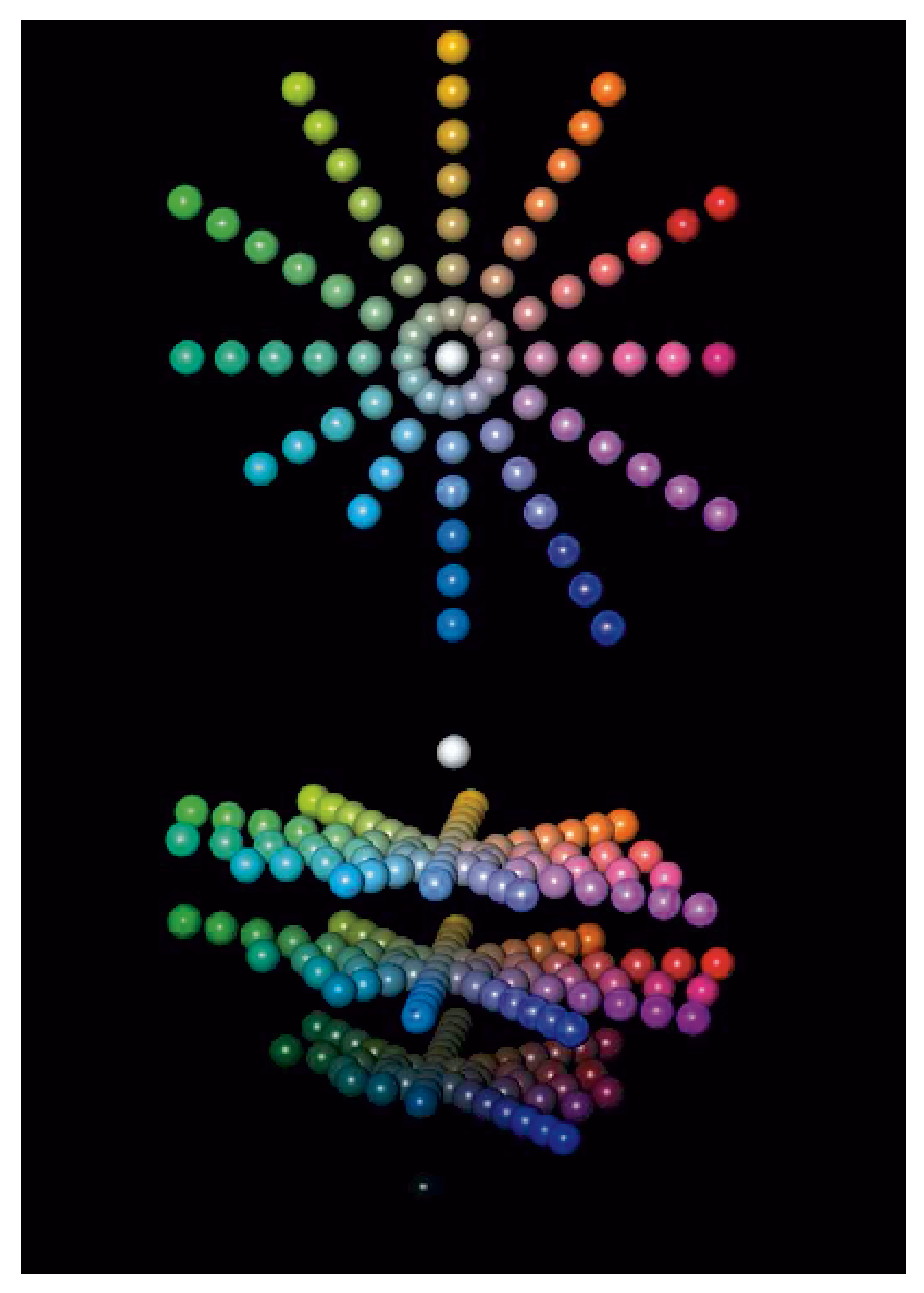


Рис. 10.3 Два варианта трехмерной компьютерной визуализации CIELAB-пространства по светлоте, насыщенности и цветовому тону.

тут против часовой стрелки. На рис. 10.3 показано полноцветное трехмерное представление цветового пространства CIELAB по размерностям светлоты, насыщенности и цветового тона.

Таким образом, поскольку формулы CIELAB на входе берут трехстимульные значения XYZ, а на выходе дают корреляты со светлотой (L^*), насыщенностью (C^*_{ab}) и цветовым тоном (h_{ab}), система CIELAB является простейшей формой модели цветового восприятия. В таблице 10.1 даны рабочие примеры CIELAB-вычислений.

Таблица 10.1 Примеры вычислений CIELAB-значений

Параметр	Пример 1	Пример 2	Пример 3	Пример 4
X	19.01	57.06	3.53	19.01
Y	20.00	43.06	6.56	20.00
Z	21.78	31.96	2.14	21.78
X_n	95.05	95.05	109.85	109.85
Y_n	100.00	100.00	100.00	100.00
Z_n	108.88	108.88	35.58	35.58
L^*	51.84	71.60	30.78	51.84
a^*	0.00	44.22	−42.69	−13.77
b^*	−0.01	18.11	2.30	−52.86
C^*_{ab}	0.01	47.79	42.75	54.62
h_{ab}	270.0	22.3	176.9	255.4

Несмотря на то, что CIELAB-пространство — это простейший пример модели цветового восприятия, у системы имеется ряд известных ограничений.

Перцепционную равномерность CIELAB можно оценить, построив графики постоянного цветового тона и постоянной насыщенности по образцам *Манселловского атласа цветов* (рис. 10.4). Поскольку манселловская система создавалась перцепционно равномерной, в частности по параметрам цветового тона и насыщенности, то можно предположить, что рисунок 10.4 будет представлять собой набор идеальных концентрических кругов (представляющих контуры постоянной насыщенности) и прямых линий, радиально расходящихся из центра (представляющих постоянный цветовой тон).

Как видно из рис. 10.4, CIELAB-пространство вполне прилично справляется с задачей равномерного представления манселловской системы, однако дальнейшее исследование контуров постоянного цветового тона с использованием CRT-дисплея (способного к воспроизводству стимулов большей насыщенности, нежели манселловский атлас) выявляет несоответствие между визуальными результатами и их предикторами (к примеру, Ханг и Бернс, 1995). На рис. 10.5 показаны линии постоянного цветового тона, полученные Хангом и Бернсом (1995): хорошо видно, что в CIELAB-пространстве линии искривлены, особенно в области красных и синих цветовых тонов.

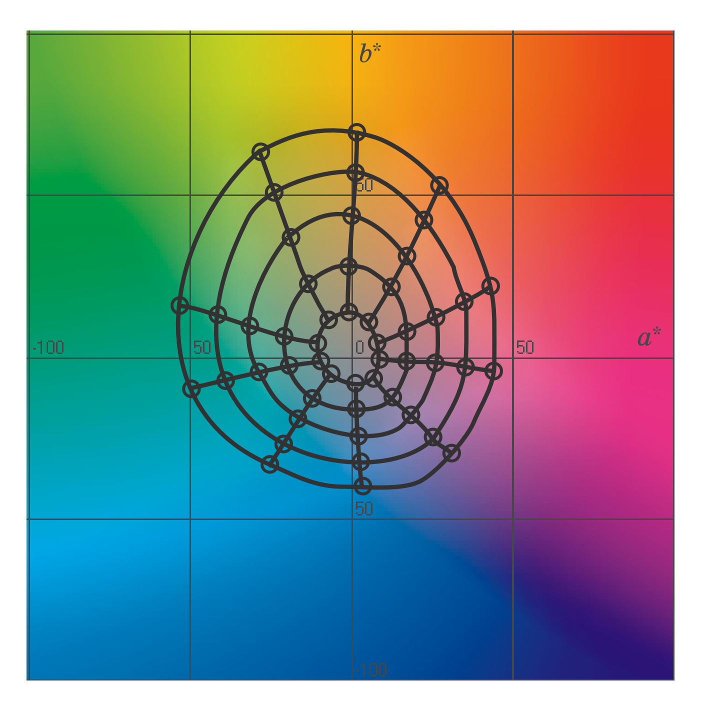


Рис. 10.4 Контуры постоянной манселловской насыщенности и постоянного цветового тона (при манселловской светлоте 5), нанесенные на плоскость CIELAB a^*b^*.

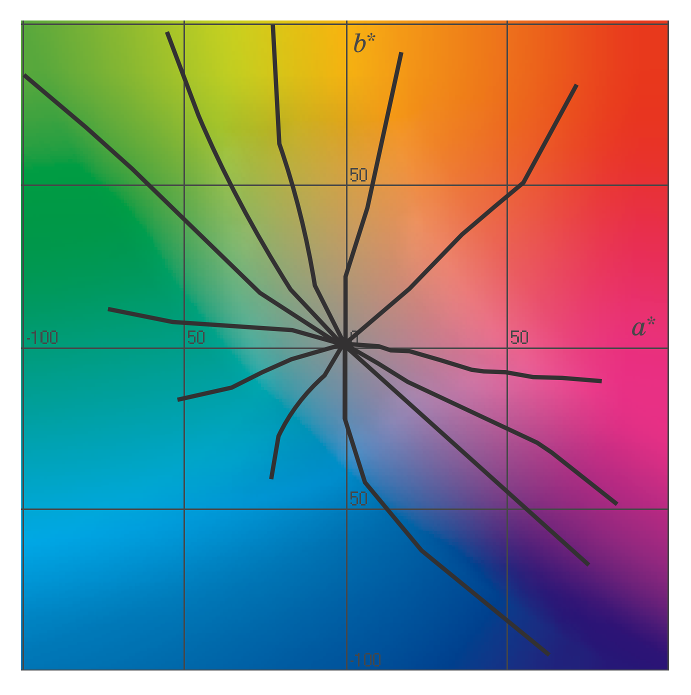


Рис. 10.5 Контуры постоянного цветового тона, полученные Хангом и Бернсом (1995).

Шкалу светлоты CIELAB можно проверить аналогичным образом, построив график манселловской светлоты как функции от L^* (рис. 10.6). Очевидно, что L^* очень хорошо прогнозирует манселловскую светлоту, причем даже лучше, чем полином пятого порядка, использованный для ее определения (Фершильд, 1995): мы видим, что результат, показанный на рис. 10.6, не противоречит ис-

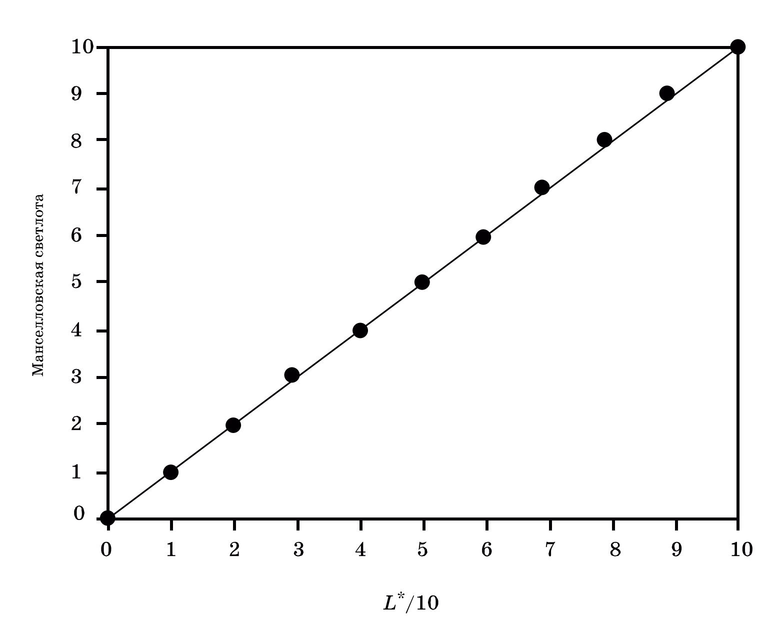


Рис. 10.6 Манселловская светлота как функция от CIELAB L^*. Вспомогательная линия демонстрирует наклон, равный 1.0, благодаря чему хорошо видно, что не все точки находятся на одной прямой.

торической схеме расчета L^*-шкалы как максимально приближенной к манселловской шкале светлоты (Робертсон, 1990).

Также стоит отметить, что перцепционно-однозначные цветовые тона (красный, зеленый, желтый и синий) не располагаются непосредственно на a^*- и b^*-осях. Однозначные цветовые тона при дневном освещении лежат примерно на 24° (красный), 90° (желтый), 162° (зеленый) и 246° (синий) (Фершильд, 1996).

Прочие ограничения CIELAB связаны с тем, что расчет смены хроматической адаптации по фон Кризу производится с CIE XYZ-данными, а не с колбочковыми чувствительностями, то есть, мы можем говорить о *псевдофонкризовском расчете смены хроматической адаптации* (Терстиге, 1972), что показано в следующем разделе.

Псевдофонкризовский расчет смены хроматической адаптации

Фонкризовский расчет, применяемый к величинам, отличным от колбочковых ответов (LMS-значения иногда называют фундаментальными трехстимульными значениями), Терстиге (1972) назвал «*Псевдофонкризовским расчетом смены хроматической адаптации*». Таким образом, CIELAB включает в себя псевдофонкризовское расчет, выполняемый путем нормировки CIE XYZ-значений стимула на CIE XYZ-значения источника освещения. Важно понимать, что нормировка XYZ не эквивалентна процессу первичного линейного преобразования в колбочковые ответы (с их последующей нормировкой). Данный тезис иллюстрируют формулы 10.7–10.11, которые конвертируют корректный фонкризовский расчет, представленный в матричной форме, в процедуру, проводимую с CIE-трехстимульными значениями.

Псевдофонкризовский расчет, включенный в CIELAB, можно выразить как

диагонально-матричное преобразование трехстимульных значений CIE XYZ, тогда как «истинный» фонкризовский расчет смены хроматической адаптации — это диагонально-матричное преобразование LMS-колбочковых ответов по формуле 10.7:

$$\begin{vmatrix} L_а \\ M_а \\ S_а \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_L & 0 & 0 \\ 0 & k_M & 0 \\ 0 & 0 & k_S \end{vmatrix} \begin{vmatrix} L \\ M \\ S \end{vmatrix} \quad (10.7)$$

Поскольку LMS-колбочковые ответы могут быть выражены как линейная трансформация CIE XYZ-трехстимульных значений, уравнение 10.8 может быть получено из уравнения 10.7 путем простой замены, а уравнение 10.9 выводится путем алгебраического действия:

$$\mathbf{M}\begin{vmatrix} X_а \\ Y_а \\ Z_а \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_L & 0 & 0 \\ 0 & k_M & 0 \\ 0 & 0 & k_S \end{vmatrix} \mathbf{M} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \quad (10.8)$$

$$\begin{vmatrix} X_а \\ Y_а \\ Z_а \end{vmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{vmatrix} k_L & 0 & 0 \\ 0 & k_M & 0 \\ 0 & 0 & k_S \end{vmatrix} \mathbf{M} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \quad (10.9)$$

Характер **M**-матрицы критичен: она никогда не является диагональной матрицей.

Типичная **M**-матрица дана в уравнении 10.10:

$$\mathbf{M} = \begin{vmatrix} 0.390 & 0.689 & -0.079 \\ -0.230 & 1.183 & 0.046 \\ 0 & 0 & 1.000 \end{vmatrix} \quad (10.10)$$

Уравнение 10.9 (задействующее M-матрицу уравнения 10.10) можно оценить при помощи уравнения 10.11: поскольку матричное преобразование, связывающее трехстимульные значения стимулов до и после адаптации, не является диагональной матрицей, псевдофонкризовский расчет не может быть равен истинному фонкризовскому расчету, построенному на колбочковых ответах:

$$\begin{vmatrix} X_а \\ Y_а \\ Z_а \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.74k_L + 0.26k_M & 1.32k_L - 1.32k_M & -0.15k_L - 0.05k_M + 0.20k_S \\ 0.14k_L - 0.14k_M & 0.26k_L + 0.74k_M & -0.03k_L + 0.03k_S \\ 0 & 0 & k_S \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \quad (10.11)$$

Интересный экспериментальный пример ущербности псевдофонкризовского расчета, содержащегося в формулах CIELAB, приводит Лиу (1995), изучав-

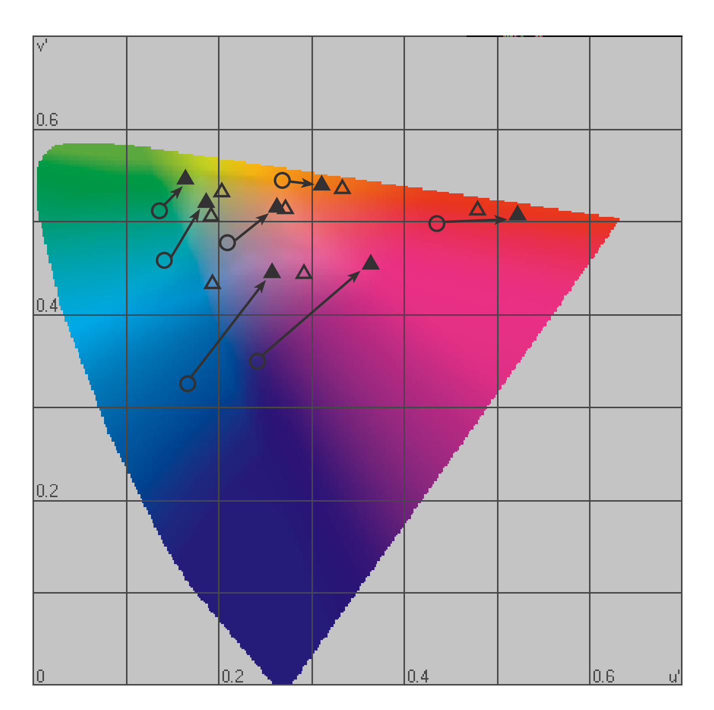


Рис. 10.7 Предикторы некоторых согласованных цветовых стимулов, полученные с помощью CIELAB-модели. Полые треугольнички представляют визуальные данные; сплошные треугольнички — предикторы модели.

ший сдвиг цветового тона на образцах танзанита (драг. камень) при переходе от дневного освещения к свету ламп накаливания: некоторые образцы танзанита воспринимаются синими при дневном свете и фиолетовыми при «вольфрамовом» освещении. Однако формулы CIELAB прогнозируют, что в такой ситуации изменение цветового тона минерала будет направлено от синего к сине-зеленому, то есть прямо противоположно фактическому изменению цветового тона. Когда же вычисления выполняются по истинной фонкризовской схеме, то сдвиг цветового тона прогнозируется верно (Лиу и колл., 1995). Мороней (2003), исследовавший слабую константность по синему системы CIELAB, дает детальное и развернутое толкование этого факта.

Бренемановские согласованные цветовые стимулы, задействованные для сравнения моделей хроматической адаптации (см. гл. 9), были также использованы для оценки точности расчета смены хроматической адаптации в формулах CIELAB. Предикторы и визуальные результаты показаны на рис. 10.7: мы видим, что ошибки прогноза существенно больше, чем при нормальном фонкризовском расчете (см. рис. 9.2 в гл. 9). Наибольшими оказались погрешности в прогнозе цветового тона синих стимулов при переходе адаптации с дневного освещения на свет ламп накаливания, что четко коррелирует с результатами Лиу (1995) в отношении танзанита.

10.4 ПОЧЕМУ НЕ ТОЛЬКО CIELAB?

Неизбежно возникают вопросы: если на протяжении более чем двадцати лет повсеместно используется CIELAB (ставшее de facto международным стандартом), способное к прогнозированию цветового восприятия, то почему нам все-таки нужны иные модели? Если CIELAB успешно выполняет миссию модели цветового восприятия в большинстве популярных отраслей науки и промышленности (что будет показано в 15-й главе), то зачем нам что-то еще?

Большая часть ответа на поставленные вопросы — это ограничения CIELAB, обсуждавшиеся ранее: модифицированный фонкризовский расчет смены адаптации, интегрированный в формулы CIELAB, гораздо менее точен, нежели те преобразования, что по сути своей ближе к физиологии зрения; ошибки CIELAB в прогнозе цветового тона заставляют нас работать над дальнейшем развитием моделей цветового восприятия.

Существует ряд аспектов цветового восприятия, в которых CIELAB вообще бессильно:

— CIELAB совершенно независимо от абсолютного уровня яркости, то есть неспособно прогнозировать яркостно-зависимые феномены, такие, как эффекты Ханта и Стивенса;

— CIELAB независимо от фона и окружения, следовательно, не может быть использовано для прогнозирования симультанного контраста или эффекта Бартлесона — Бренемана (изменение контраста изображения при изменении относительной яркости окружения);

— CIELAB не имеет механизма моделирования когнитивных эффектов, таких, как когнитивное обесцвечивание осветителя (учет которого важен при репродуцировании изображений на разных носителях);

— и наконец, CIELAB не дает коррелятов с абсолютными атрибутами восприятия, такими, как субъективная яркость и полнота цвета.

Вспомним Примечание 6 к CIE-публикации 15.2 (CIE, 1986), касающееся CIELAB- и CIELUV-пространств:

> *«Целевое назначение данных пространств — это выявление отличий между цветами объектов, имеющих сходную форму и размер, рассматриваемых при одном и том же белом свете на средне-сером фоне и при условии фотопической адаптации наблюдателя к полю зрения, цветность которого не отличается от усредненной цветности дневного света».*

Длинный список ограничений CIELAB указывает на то, что модели цветового восприятия — это реальная возможность всерьез улучшить существующее положение дел. Намного более развитые модели будут описаны в следующих главах нашей книги, но о простой CIELAB-модели мы должны помнить как об эталоне, с помощью которого всегда можно ответить на вопрос: является ли та или иная «навороченная» модель действительно усовершенствованной?

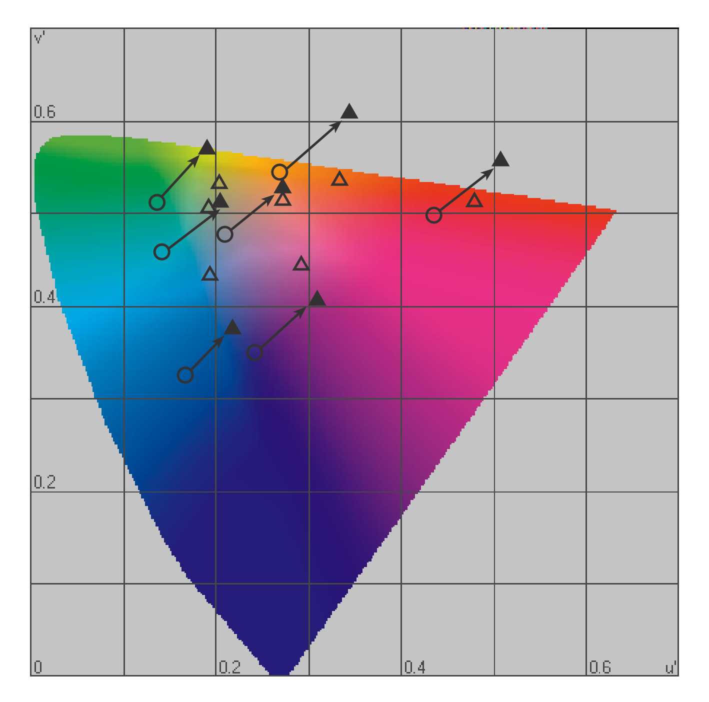


Рис. 10.8 Предикторы некоторых согласованных цветовых стимулов, полученные с помощью CIELUV-модели. Полые треугольнички представляют визуальные данные; сплошные треугольнички — предикторы модели.

10.5 ЧТО НАМ ДЕЛАТЬ С CIELUV?

Поскольку CIELAB можно толковать как модель цветового восприятия, возникает вопрос: что же представляет собой цветовое пространство CIELUV, также рекомендованное CIE в 1976 г.? CIELUV обладает многими свойствами CIELAB (к примеру, стимул и цветность источника на входе — предикторы светлоты, насыщенности и цветового тона на выходе), благодаря чему могло бы заслуживать не меньшего внимания. Однако CIELUV включает в себя иную форму расчета смены хроматической адаптации, нежели CIELAB: LUV использует т.н. субтрактивный сдвиг координат цветности ($u' - u'_n$, $\upsilon' - \upsilon'_n$), а не нормировку трехстимульных значений (X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n). Расчет смены хроматической адаптации, интегрированный в CIELUV, лежит еще дальше от физиологической реальности, чем псевдофонкризовский, заложенный в CIELAB.

Субтрактивный сдвиг, не ровен час, может выдать предиктор согласованного стимула, лежащий вне охвата реальных цветов (что вызвано отрицательными величинами в расчетных трехстимульных значениях и чего уж никак не может произойти при CIELAB-расчетах), но даже если такого и не произойдет, преобразование, скорее всего, сместит предикторы за границы охвата любого цветовоспроизводящего устройства. Вдобавок расчет смены адаптации в CIELUV крайне неточен в отношении контрольных визуальных данных, что замечательно иллюстрирует рис. 10.8, на котором отмечены предикторы бренемановских согласованных стимулов: хорошо заметны смещение некоторых цветов за границы реального охвата (то есть за пределы спектрального локуса диаграммы $u'\upsilon'$) и низкая точность большинства предикторов.

Сложности, связанные с расчетом смены адаптации в CIELUV, — это достаточное основание для того, чтобы исключить данное пространство из семейства моделей цветового восприятия. Еще одним доказательством ущербности CIELUV является его слабость в плане прогноза цветовых отличий. Обратите внимание на то, что текущая рекомендация CIE по спецификации цветовых отличий CIE94 (CIE, 1995) основана именно на CIELAB, и то же относится к формулам CIE DE2000 (CIE, 2001). Однако, поскольку формулы DE2000 появились совсем недавно и поскольку они существенно сложнее, чем CIE94, нет гарантий того, что DE2000 будет поддержана большинством приложений.

Альман и колл. (1989) экспериментально продемонстрировали ущербность CIELUV как системы выявления цветовых отличий, а дополнительное сравнение CIELUV с CIELAB было выполнено Робертсоном (1990).

11 МОДЕЛЬ НАЯТАНИ

Наиболее часто обсуждаемые и популярные модели цветового восприятия мы детально рассмотрим в следующих главах. В текущей главе разговор пойдет о модели цветового восприятия, разработанной научной командой Наятани. Модель Наятани — это одна из первых моделей цветового восприятия, построенная на базе традиционной колориметрии. Наряду с хантовской (описана в гл. 12) модель Наятани — это полноценная модель, способная к прогнозированию полного набора параметров цветового восприятия (описаны в гл. 4) в весьма широком диапазоне условий просмотра.

11.1 ЦЕЛИ И ПОДХОД

Модель цветового восприятия, разработанная научной группой Наятани — это естественное продолжение модели хроматической адаптации, описанной в 9-й главе (Наятани и колл., 1981). Модель была опубликована Наятани в 1986 г., но сравнительно недавно пересмотрена (Наятани, 1995), поэтому в текущей главе мы дадим ее последнюю версию.

Рассматривая ту или иную модель цветового восприятия, всегда нужно обращать внимание на обстоятельства, при которых она была создана: ученые, занимавшиеся разработкой модели Наятани, — это выходцы из светотехники, в которой модели цветового восприятия используются для спецификации цветовоспроизводящих свойств источников освещения. Последнее по своим задачам несколько отлично от репродуцирования изображений, и, следовательно, модель Наятани не может удовлетворить все запросы индустрии создания и обработки изображений. Справедливо и обратное: модели, разработанные только для работы с изображениями, не покрывают всех потребностей светотехники.

Несмотря на то, что у разных моделей восприятия разные истоки, есть прямой смысл попытаться опробовать различные модели в «неродной» сфере: если повезет — модель будет хорошо работать (свидетельство ее универсальности), а если нет — мы получим больше информации о различиях между разными областями применения моделей. Таким образом, несмотря на то, что модель Наятани не предназначена для работы с изображениями, нет преград к тому, чтобы попытаться опробовать ее как в данной сфере, так и в любой другой, требующей использования модели цветового восприятия.

Помимо эффектов хроматической адаптации модель Наятани пытается прогнозировать ряд феноменов: эффект Стивенса, эффект Ханта и эффект Хельсона — Джадда.

Модель разработана для прогнозирования цветового восприятия простых патчей, находящихся на равномерном (от средне-серого до светло-серого) фоне. Для прогноза цветового восприятия сложных стимулов или простых стимулов неоднородном фоне (или в неоднородном окружении) модель непригодна.

Выходные значения модели Наятани коррелируют со всеми главными атрибутами цветового восприятия: субъективной яркостью, светлотой, полнотой цвета, насыщенностью и цветовым тоном.

То, что модель создана для работы лишь с простыми стимулами, расположенными на равномерных фонах, что отличает ее от моделей Ханта, RLAB и CIECAM02, которые выдают атрибуты, специфичные для работы с изображениями. Это ограничение модели Наятани не проявляет себя при оценке цветовоспроизводящих свойств источников освещения.

11.2 ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Входные данные модели включают в себя колориметрическую и фотометрическую спецификации стимула, адаптирующего осветителя и коэффициента фотометрической яркости фона, то есть:

— коэффициент фотометрической яркости ахроматичного фона выражен как процент от Y_o и может быть больше или равен 18% ;

— цвет осветителя выражен в координатах цветности для стандартного наблюдателя CIE 1931 (x_o, y_o);

— исследуемый стимул выражен тремя значениями: координатами цветности (x, y) и коэффициентом фотометрической яркости (Y);

— абсолютные фотометрические яркости стимула и адаптирующего поля задаются освещенностью поля зрения в люксах (E_o).

Также необходимы еще два параметра:

— нормирующая освещенность (E_{or}), выраженная в люксах (обычно в диапазоне от 1000 до 3000 lux);

— шумовой фактор (n), используемый в нелинейной модели хроматической адаптации, входящей в данную модель цветового восприятия, и обычно равный единице.

Исходя из перечисленных входных данных, модель рассчитывает всевозможные промежуточные и окончательные выходные данные (уравнения даны в следующих разделах текущей главы).

Перед выполнением основных операций понадобится ряд предварительных вычислений, первое из которых — это вычисление адаптирующей (L_o) и нормирующей (L_{or}) фотометрических яркостей (cd/m^2) по уравнениям 11.1 и 11.2:

$$L_o = \frac{Y_o E_o}{100\pi} \tag{11.1}$$

$$L_{or} = \frac{Y_o E_{or}}{100\pi} \tag{11.2}$$

В отношении уравнений 11.1 и 11.2 сделано допущение, что фон — это ламбертовский рассеиватель.

Второе предварительное вычисление — это преобразование CIE-трехстимульных значений адаптирующего поля (представленных в виде координат цветности) в колбочковые ответы. Преобразование выполняется не напрямую,

а через вычисление трех промежуточных величин: ξ (кси), η (эта) и ζ (дзета) (уравнения 11.3–11.5):

$$\xi = (0.48105x_o + 0.78841y_o + 0.08081)/y_o \tag{11.3}$$

$$\eta = (-0.27200x_o + 1.11962y_o + 0.04570)/y_o \tag{11.4}$$

$$\zeta = 0.91822(1 - x_o - y_o)/y_o \tag{11.5}$$

11.3 МОДЕЛЬ АДАПТАЦИИ

Работа всех моделей цветового восприятия, в том числе и модели Наятани, начинается с расчета смены хроматической адаптации при переходе от одних условий просмотра к другим. В последней версии модели задействован усовершенствованный нелинейный расчет, описанный в 9-й главе (Наятани и колл., 1981, CIE 1994), однако в составе модели Наятани расчет смены адаптации представлен в несколько ином виде. Мы не будем пытаться вычленить его оттуда, а просто по ходу обсуждения будем отмечать те особенности расчета смены адаптации, что более всего важны для понимания сути всей модели восприятия.

Итак, первым делом должны быть вычислены колбочковые ответы по адаптирующему полю с учетом абсолютного уровня фотометрической яркости (уравнение 11.6).

Уравнение 11.6 включает в себя преобразование цветностей, рассчитанное по уравнениям 11.3–11.5, а также уровень освещенности (E_o) и коэффициент фотометрической яркости адаптирующего фона (Y_o):

$$\begin{vmatrix} R_o \\ G_o \\ B_o \end{vmatrix} = \frac{Y_o E_o}{100\pi} \begin{vmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{vmatrix} \tag{11.6}$$

Взяв колбочковые ответы по данному уровню адаптации (рассчитанные с помощью уравнения 11.6), по формулам 11.7–11.9 вычисляем показатели степени для нелинейного расчета смены хроматической адаптации. Отметим, что в данной формулировке показатель степени для коротковолновочувствительных колбочек (B-ответы в лексике Наятани) рассчитывается несколько иначе, чем показатели степеней для средне- и длинноволновочувствительных (G- и R-ответы в лексике Наятани):

$$\beta_1(R_o) = \frac{6.469 + 6.362R_o^{0.4495}}{6.469 + R_o^{0.4495}} \tag{11.7}$$

$$\beta_1(G_o) = \frac{6.469 + 6.362G_o^{0.4495}}{6.469 + G_o^{0.4495}} \tag{11.8}$$

$$\beta_2(B_o) = \frac{8.414 + 8.091 B_o^{0.5128}}{8.414 + B_o^{0.5128}} \times 0.7844 \quad (11.9)$$

По той же функциональной схеме (что и степени для средне- и длинноволновочувствительных колбочек) должен быть рассчитан дополнительный степенной коэффициент, зависящий от нормирующей яркости (формула 11.10):

$$\beta_1(L_{or}) = \frac{6.469 + 6.362 L_{or}^{0.4495}}{6.469 + L_{or}^{0.4495}} \quad (11.10)$$

Колбочковые ответы по исследуемому стимулу рассчитываются традиционно, то есть путем линейного матричного преобразования трехстимульных значений (уравнение 11.11):

$$\begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.40024 & 0.70760 & -0.08081 \\ -0.22630 & 1.16532 & 0.04570 \\ 0.0 & 0.0 & 0.91822 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \quad (11.11)$$

Финальный этап: вычисление двух шкалирующих коэффициентов $e(R)$ и $e(G)$ по формулам 11.12 и 11.13:

$$e(R) = \begin{cases} 1.758 & R \geq 20\xi \\ 1.0 & R < 20\xi \end{cases} \quad (11.12)$$

$$e(G) = \begin{cases} 1.758 & G \geq 20\eta \\ 1.0 & G < 20\eta \end{cases} \quad (11.13)$$

Приведенные выше вычисления обеспечивают расчет всех промежуточных данных, необходимых для реализации нелинейного расчета смены хроматической адаптации. Данные должны быть высокоточными, поскольку входят в состав уравнений, из которых строится полная модель цветового восприятия.

11.4 ОППОНЕНТНЫЕ ЦВЕТОВЫЕ РАЗМЕРНОСТИ

Колбочковые ответы, преобразованные в промежуточные значения, представляют классические оппонентные размерности зрительного ответа: ахроматический канал и два хроматических.

Первым рассчитывается ахроматический ответ (Q), вычисляемый по формуле 11.14:

$$Q = \frac{41.69}{\beta_1(L_{or})} \left[\frac{2}{3} \beta_1(R_o) e(R) \log \frac{R+n}{20\xi + n} + \frac{1}{3} \beta_1(G_o) e(G) \log \frac{G+n}{20\eta + n} \right] \quad (11.14)$$

На первый взгляд, формула 11.14 очень сложна и громоздка, но ее можно легко разложить на составляющие и разобраться в них: общая структура уравнения 11.14 такова, что ахроматический ответ рассчитывается как взвешенная

сумма выходных длинно- и средневолновых колбочковых ответов (R и G), что типично для науки о цветовом зрении. Выходные значения суммированы в соотношении 2:1 (2/3+1/3) согласно относительной колбочковой заселенности сетчатки.

Первым делом к выходным значениям (R и G) добавляется шум (n), а затем, согласно фон Кризу, выполняется нормировка на колбочковые ответы по адаптирующему стимулу также с добавкой шума ($20\xi + n$). Величина n, как правило, берется равной единице, хотя порой она может меняться.

Затем с целью моделирования нелинейной компрессии, свойственной человеческому зрению, следует логарифмирование.

Учитывая логарифмическое преобразование, степени нелинейной модели хроматической адаптации (β-значения), наряду со шкалирующими факторами $e(R)$ и $e(G)$, становятся мультипликативными коэффициентами уравнения 11.14.

И наконец, для расчета ахроматического ответа Q требуется:

— еще один шкалирующий коэффициент (41.69);

— яркостно-зависимый регулятор $\beta_1(L_{or})$.

Таким образом, ахроматический ответ может быть выражен просто как взвешенная сумма постадаптационных сигналов от длинно- и средневолновочувствительных колбочек.

На следующем этапе аналогичным образом (уравнения 11.15–11.16) рассчитываются ответы по хроматическим каналам — t (краснота-зелень) и p (желтизна-синева):

$$t = \beta_1(R_o)\log\frac{R+n}{20\xi+n} - \frac{12}{11}\beta_1(G_o)\log\frac{G+n}{20\eta+n} + \frac{1}{11}\beta_2(B_o)\log\frac{B+n}{20\zeta+n} \qquad (11.15)$$

$$p = \frac{1}{9}\beta_1(R_o)\log\frac{R+n}{20\xi+n} + \frac{1}{9}\beta_1(G_o)\log\frac{G+n}{20\eta+n} - \frac{2}{9}\beta_2(B_o)\log\frac{B+n}{20\zeta+n} \qquad (11.16)$$

Уравнения 11.15 и 11.16 подчинены той же логике, что и уравнение для ахроматического ответа (уравнение 11.14):

t-ответ — это взвешенная комбинация постадаптационных сигналов от колбочек каждого из трех типов, то есть — разность между ответами длинно- и средневолновочувствительных колбочек с небольшой добавкой ответа коротковолновочувствительных колбочек (1/11). В итоге имеем: краснота минус зелень плюс небольшая красноватая добавка из коротковолнового конца спектрального диапазона. Последняя часто используется для объяснения фиолетового (не синего) восприятия волн данной области спектра, а также для корректного прогноза однозначного желтого;

p-ответ рассчитан аналогичным образом, то есть путем добавки ответов от длинно- и средневолновочувствительных колбочек (дающих на выходе желтый ответ) с последующим вычитанием ответа коротковолновочувствительных колбочек (дающих на выходе оппонентный синий ответ). Взвешивающие коэффициенты те же, что и в хантовской модели.

Любопытно, что литеры «t» и «p» — это первые буквы терминов «тритано-

пический» и «протанопический». У тританопов наблюдаем только красно-зеленый ответ (t), а у протанопов только желто-синий (p). Ответы Q, t и p в дальнейшем используются для вычисления коррелятов субъективной яркости, светлоты, чистоты цвета, его полноты и цветового тона.

Угол цветового тона (θ) рассчитывается непосредственно из t и p согласно уравнению 11.17:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{p}{t}\right) \tag{11.17}$$

Угол цветового тона лежит в диапазоне положительных значений от 0° (который находится на положительной t-оси) до 360°, то есть так же, как и в CIELAB-цветовом пространстве (CIE 1986). Угол цветового тона необходим для расчета некоторых коррелятов восприятия, поскольку в ряде случаев требуется специальный цветотонально-зависимый регулирующий коэффициент.

11.5 СУБЪЕКТИВНАЯ ЯРКОСТЬ

Субъективная яркость тестируемого образца (B_{r}) вычисляется по уравнению 11.18:

$$B_{\mathrm{r}} = Q + \frac{50}{\beta_1(L_{\mathrm{or}})}\left[\frac{2}{3}\beta_1(R_{\mathrm{o}}) + \frac{1}{3}\beta_1(G_{\mathrm{o}})\right] \tag{11.18}$$

где Q — это ахроматический ответ, взятый из уравнения 11.14 и подправленный степенями адаптации, отнесенными к абсолютному уровню фотометрической яркости (как того требует субъективная яркость в противоположность светлоте).

Также необходим расчет субъективной яркости идеального белого — B_{rw} — согласно уравнению 11.19, полученному путем подстановки уравнения 11.14 (оцененного для идеального отражающего рассеивателя) в формулу 11.18:

$$B_{\mathrm{rw}} = \frac{41.69}{\beta_1(L_{\mathrm{or}})}\left[\frac{2}{3}\beta_1(R_{\mathrm{o}})(1.758)\log\frac{100\xi + n}{20\xi + n} + \frac{1}{3}\beta_1(G_{\mathrm{o}})(1.758)\log\frac{100\eta + n}{20\eta + n}\right] + \frac{50}{\beta_1(L_{\mathrm{or}})}\left[\frac{2}{3}\beta_1(R_{\mathrm{o}}) + \frac{1}{3}\beta_1(G_{\mathrm{o}})\right] \tag{11.19}$$

11.6 СВЕТЛОТА

Ахроматическая светлота (L_p^*) тестового образца вычисляется непосредственно из ахроматического ответа (Q) путем простой добавки 50 (уравнение 11.20): так сделано потому, что ахроматический ответ может иметь как положительные, так и отрицательные значения (Q средне-серого равен 0.0), в то время как светлота шкалирована от 0 (черный) до 100 (белый):

$$L_p^* = Q + 50 \tag{11.20}$$

Вторым коррелятом светлоты является т.н. нормированная ахроматическая светлота (L_N^*), вычисляемая согласно CIE-тезису о том, что светлота — это

субъективная яркость исследуемого образца отнесенная к субъективной яркости белого (уравнение 11.21):

$$L_N^* = 100\left(\frac{B_{\text{r}}}{B_{\text{rw}}}\right) \tag{11.21}$$

Разность между двумя светлотными коррелятами L_p^* и L_N^* в целом незначительна. Ни одно из значений светлоты не коррелирует со светлотой хроматических объектов, поскольку модель не учитывает эффект Гельмгольца — Кольрауша (Фершильд и Пиротта, 1991; Наятани и колл., 1992). Для учета эффекта Гельмгольца — Кольрауша необходима дополнительная модель, поскольку требуется сравнение светлот (или субъективных яркостей) стимула при различных цветовых тонах и/или насыщенностях.

11.7 ЦВЕТОВОЙ ТОН

Вычисление угла цветового тона (θ) по уравнению 11.17 идентично методу, использованному в CIELAB-пространстве; более наглядные корреляты цветового тона могут быть получены определением т.н. *квадратуры цветового тона* (H) и *состава цветового тона* (H_C).

Квадратура цветового тона (H) — это 400-шаговая шкала цветового тона, в которой каждый однозначный цветовой тон имеет следующие значения: 0 (красный), 100 (желтый), 200 (зеленый) и 300 (синий). Квадратура цветового тона вычисляется путем линейной интерполяции, задействующей угол цветового тона (θ) исследуемого образца и углы четырех однозначных цветовых тонов: 20.14° (красный), 90.00° (желтый), 164.25° (зеленый) и 231.00° (синий).

Состав цветового тона (hue composition) (H_C) описывает цветовой тон в процентах от двух однозначных цветовых тонов, из которых получен исследуемый цветовой тон, к примеру: оранжевый может быть выражен как $50Y50R$, что указывает на его срединное положение между однозначным красным и однозначным желтым. Состав цветового тона вычисляется простой линейной конверсией квадратуры цветового тона в процентную долю однозначных цветовых тонов, лежащих по обеим сторонам от исследуемого тона, к примеру: стимул с цветовым тоном 43.19° будет иметь квадратуру, равную 32.98, и состав цветового тона $33Y67R$.

11.8 ЧИСТОТА ЦВЕТА

В модели Наятани чистота цвета рассчитывается напрямую, а уже из нее получаются величины полноты цвета и насыщенности. Чистота цвета выражается в величинах красно-зеленого компонента (S_{RG}), получаемого из t-ответа согласно уравнению 11.22, и желто-синего компонента (S_{YB}), получаемого из p-ответа согласно уравнению 11.23:

$$S_{RG} = \frac{488.93}{\beta_1(L_{\text{or}})} E_{\text{S}}(\theta) t \tag{11.22}$$

$$S_{YB} = \frac{488.93}{\beta_1(L_{or})} E_S(\theta)p \qquad (11.23)$$

Предикторы чистоты цвета по красно-зеленому и желто-синему компонентам рассчитываются с учетом:

— шкалирующего коэффициента 488.93 (для удобства);

— яркостно-зависимых β-величин (необходимы для прогноза хантовского эффекта);

— функции хроматической интенсивности $E_S(\theta)$ (получена эмпирическим путем и используется для представления шкалы чистоты цвета как функции от цветового тона [Наятани, 1995]) по уравнению 11.24:

$$E_S(\theta) = 0.9394 - 0.2478\sin\theta - 0.0743\sin 2\theta + 0.0666\sin 3\theta - 0.0186\sin 4\theta$$
$$-0.0055\cos\theta - 0.0521\cos 2\theta - 0.0573\cos 3\theta - 0.0061\cos 4\theta \qquad (11.24)$$

Наконец, коррелят общей чистоты цвета (S) вычисляется по уравнению 11.25, которое функционально идентично уравнению насыщенности в CIELAB-пространстве (эвклидово расстояние от нулевой отметки):

$$S = \sqrt{(S_{RG}^2 + S_{YB}^2)} \qquad (11.25)$$

11.9 НАСЫЩЕННОСТЬ

Корреляты насыщенности могут быть легко получены на основе вышеописанных коррелятов чистоты цвета. Как показано в четвертой главе, чистоту цвета можно выразить как отношение насыщенности к светлоте, следовательно, насыщенность — это произведение чистоты цвета и его светлоты. Сказанное почти совпадает с функциональной схемой насыщенности по Наятани: корреляты насыщенности красно-зеленого компонента (C_{RG}), желто-синего компонента (C_{YB}) и общей насыщенности исследуемого образца даны в уравнениях 11.26–11.28:

$$C_{RG} = \left(\frac{L_p^*}{50}\right)^{0.7} S_{RG} \qquad (11.26)$$

$$C_{YB} = \left(\frac{L_p^*}{50}\right)^{0.7} S_{YB} \qquad (11.27)$$

$$C = \left(\frac{L_p^*}{50}\right)^{0.7} S \qquad (11.28)$$

Отличие между номинальным определением насыщенности и уравнениями 11.26–11.28 состоит лишь в наличии шкалирующего коэффициента 50, а также легкой нелинейности за счет степенной функции светлоты (0.7). Данная не-

линейность была введена с целью наилучшего моделирования контуров насыщенности *Манселловского атласа цветов* (Наятани и колл., 1995).

11.10 ПОЛНОТА ЦВЕТА

Предикторы полноты цвета в модели Наятани можно также получить напрямую, руководствуясь CIE-определениями атрибутов восприятия. Вспомним, что насыщенность позиционируется как отношение полноты цвета образца к субъективной яркости белого объекта при том же освещении. Следовательно, полнота цвета — это произведение насыщенности образца и субъективной яркости идеального белого (формулы 11.29–11.31):

$$M_{RG} = C_{RG} \frac{B_{rw}}{100} \tag{11.29}$$

$$M_{YB} = C_{YB} \frac{B_{rw}}{100} \tag{11.30}$$

$$M = C \frac{B_{rw}}{100} \tag{11.31}$$

Для удобства согласования шкал выполняется нормировка на 100. Нормирующий коэффициент 100 — это отношение субъективной яркости идеальной белой поверхности под D65-осветителем к нормирующей освещенности.

11.11 ОБРАТНАЯ МОДЕЛЬ

Во многих сферах, и в особенности в деле репродуцирования изображений, необходимо использовать модель цветового восприятия в прямом и обратном направлениях, то есть нужно, чтобы уравнения модели были аналитически обратимыми. К счастью, модель Наятани можно инвертировать аналитически: в 1990 г. Наятани опубликовал статью, в которой был описан процесс инверсии модели по параметрам субъективной яркости/полноты цвета и светлоты/насыщенности, и несмотря на то, что с тех пор модель слегка видоизменилась, общее направление процедуры остается тем же.

Часто оказывается полезным рассматривать работу моделей восприятия как пошаговый процесс. Необходимые шаги для прямой и обратной работы модели Наятани следующие:

1. Получение физических данных.
2. Вычисление Q, t и p.
3. Вычисление θ, $E_S(\theta)$, H и H_C.
4. Вычисление B_r, B_{rw}, L_p^*, L_N^* и S.
5. Вычисление C.
6. Вычисление M.

11.12 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФЕНОМЕНОВ

Модель Наятани учитывает изменения в цветовом восприятии в зависимости от статуса хроматической адаптации и уровня фотометрической яркости (эффекты Стивенса и Ханта). Она также прогнозирует эффект Хельсона — Джадда. Модель можно использовать при разных (больших, чем 18%),коэффициентах фотометрической яркости фона, но при этом авторы модели предостерегают от использования ее для сравнения образцов при разных уровнях фотометрической яркости фонов (Наятани и колл., 1990). Модель нельзя использовать для прогнозирования эффектов, возникающих при изменении цвета фона (то есть симультанного контраста) или относительной яркости окружения (к примеру, эффекта Бартлесона — Бренемана).

Модель Наятани также не имеет в себе механизма прогнозирования неполной адаптации или когнитивного обесцвечивания осветителя. В 1997 Наятани описал процедуру определения уровня хроматической адаптации на основе экспериментальных данных, что оказалось полезным для прогнозирования результатов визуальных экспериментов, проводимых при неполной хроматической адаптации. Однако данный метод малоинтересен в тех случаях, когда прогноз уровня хроматической адаптации должен быть выполнен для такого набора условий просмотра, при котором недоступны предварительные визуальные данные.

Четыре примера вычислений с использованием модели Наятани даны в таблице 11.1.

Таблица 11.1 Примеры вычислений по модели цветового восприятия, разработанной научной группой Наятани

Величина	Пример 1	Пример 2	Пример 3	Пример 4
X	19.01	57.06	3.53	19.01
Y	20.00	43.06	6.56	20.00
Z	21.78	31.96	2.14	21.78
X_n	95.05	95.05	109.85	109.85
Y_n	100.00	100.00	100.00	100.00
Z_n	108.88	108.88	35.58	35.58
E_o	5000	500	5000	500
E_{or}	1000	1000	1000	1000
B_r	62.6	67.3	37.5	44.2
L^*_p	50.0	73.0	24.5	49.4
L^*_N	50.0	75.9	29.7	49.4
θ	257.5	21.6	190.6	236.3
H	317.8	2.1	239.4	303.6
H_C	82*B* 18*R*	98*R* 2*Y*	61*G* 39*B*	96*B* 4*R*
S	0.0	37.1	81.3	40.2
C	0.0	48.3	49.3	39.9
M	*0.0*	*42.9*	*62.1*	*35.8*

11.13 ПОЧЕМУ НЕ ТОЛЬКО МОДЕЛЬ НАЯТАНИ?

Учитывая всеохватность модели Наятани и то, что в нее включены корреляты наиболее важных феноменов цветового восприятия, имеет смысл задать себе вопрос: почему CIE не приняла эту модель как рекомендуемую к общему употреблению? На то были основания, но прежде отметим положительные свойства модели:

— во-первых, модель содержит полный набор выходных коррелятов;

— во-вторых, модель однозначна (хотя уравнения могли бы быть и попроще) и аналитически обратима.

Однако у модели Наятани имеется ряд недостатков, из-за которых она не может быть объявлена лучшей:

— модель не может учесть изменение фона, окружения, а также не может учесть когнитивные эффекты (а все это, напомним, критично в деле репродуцирования изображений);

— модель не может спрогнозировать уровень адаптации, учет которого крайне важен в репродуцировании изображений на разных носителях;

— модель была построена и протестирована, главным образом, на простых стимулах, что ограничивает применимость модели в сложных визуальных ситуациях;

— модель явно «перебарщивает» в отношении эффекта Хельсона — Джадда, прогнозируя его возникновение при слабохроматичных осветителях (к примеру, A-осветитель). Ясно что эффект Хельсона — Джадда не возникает в таких условиях, что отмечал еще сам Хельсон (1938);

— различные методики тестирования моделей цветового восприятия, описанные в следующих главах, показали, что модель Наятани в целом не очень точна;

— и последнее: модель Наятани не учитывает скотопический компонент цветового восприятия, как то делает хантовская модель.

Если проанализировать все перечисленные ограничения, становится понятным, что модель Наятани не может претендовать на общий стандарт, однако же, ее вклад в дело развития моделей цветового восприятия огромен. Несомненно, что некоторые функциональные узлы модели Наятани займут свое место в будущих моделях цветового восприятия, о чем свидетельствует эволюция CIECAM97s и CIECAM02.

12 МОДЕЛЬ ХАНТА

Мы продолжаем обзор некоторых наиболее широко распространенных моделей цветового восприятия и в текущей главе опишем модель, разработанную Робертом Вильямом Гайнером Хантом.

Из всех моделей, что когда-либо были созданы, модель Ханта — это наиболее развитая, полная и сложная модель цветового восприятия. Корни ее лежат в ранних хантовских исследованиях хроматической адаптации (Хант, 1952), но наиболее полное развитие идеи Ханта получили в восьмидесятых и девяностых годах прошлого века (Хант, 1982, 1985, 1987, 1991, 1994, 1995). Хантовская модель непроста, но она создана для прогнозирования широкого диапазона визуальных феноменов, возникающих в зрительной системе человека (которая, как отмечает сам Хант, тоже, мягко говоря, не проста).

Существует ряд ситуаций, задачам которых вполне адекватны простые модели цветового восприятия (наподобие тех, что будут описаны в следующих главах), но ясно, что должна существовать и полная модель, способная охватить широкий диапазон условий просмотра: от четко определенных до совсем необычных. Модель Ханта настолько хорошо справляется с поставленной задачей, что многие другие модели восприятия даже заимствовали из нее ряд конструктивных узлов.

12.1 ЦЕЛИ И ПОДХОД

Тридцать шесть лет Хант трудился в научных лабораториях Eastman Kodak Company, и, разумеется, его модель разработана в контексте требований к цветовому репродуцированию изображений (что по задачам принципиально отлично от светотехники, исходя из интересов которой была создана модель Наятани). О влиянии науки об изображениях на модель Ханта можно судить по входным параметрам этой модели, к примеру: на входе присутствует относительная фотометрическая яркость окружения — важнейший фактор, отсутствующий в модели Наятани; на вход модели подаются точные данные, ориентирующие ее на выполнение расчетов для «проекционного показа слайдов в затемненном помещении», или «телевизионного просмотра при тусклом окружении», или для «обычных сцен». Перечисленные параметры четко указывают на то, что модель нацелена на работу с изображениями, однако потенциал модели ими не ограничен — модель может быть расширена до уровня изолированных цветовых стимулов, которыми оперируют традиционные научные эксперименты со зрением.

Модель Ханта разработана для прогнозирования широкого диапазона визуальных феноменов, включающих в себя восприятие неизолированных и изолированных цветовых стимулов с различными фонами, окружениями, цветностями освещений и уровнями фотометрической яркости в диапазоне от низко-

скотопического до слепящего. То есть, модель Ханта — это полная модель цветового восприятия статичных стимулов. Но отметим, что подобно другим моделям, описанным в нашей книге, она не претендует на учет сложных пространственных и временны́х характеристик восприятия.

Для того чтобы осмысленно прогнозировать цветовое восприятие в широком диапазоне условий просмотра, модель Ханта требует очень точного определения поля зрения (дано в гл. 7), компоненты которого (собственно стимул, проксимальное поле, фон и окружение) Хант позиционировал в 1991 г. Модель дееспособна только тогда, когда по отдельности оговорен каждый из перечисленных элементов.

Хантовская модель развивалась на протяжении целых двадцати лет (главные вехи: 1982, 1985, 1987, 1991 и 1994), а ее текущую формулировку можно найти в 31-й главе 5-го издания монографии Ханта «Цветовоспроизведение» (Хант, 1995)[1]. Наш сегодняшний разговор — это краткое изложение той самой главы.

12.2 ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Хантовской модели требуется большое число входных данных, причем все колориметрические координаты должны быть вычислены с использованием стандартного колориметрического наблюдателя CIE 1931 (2°):

— *координаты цветности (x, y) осветителя и адаптирующего поля*. Обычно адаптирующее поле берется как интегральная цветность сцены, которая, как предполагается, идентична цветности осветителя (источника);

— *координаты цветности (x, y) и коэффициент фотометрической яркости (Y) фона, проксимального поля, эталонного белого и исследуемого образцов*. Если отдельных данных по проксимальному полю нет — его обычно считают идентичным фону. Также, если нет конкретных данных о цветности эталонного белого, она принимается равной цветности осветителя, а коэффициент яркости эталонного белого объявляется равным 100.

Все перечисленные данные — это относительные колориметрические величины, однако для прогноза некоторых яркостно-зависимых феноменов требуются абсолютные уровни фотометрической яркости. Абсолютные уровни фотометрической яркости в cd/m^2 необходимы для эталонного белого и адаптирующего поля, но если данные о яркости адаптирующего поля недоступны, она приравнивается к 20% фотометрической яркости эталонного белого (при этом предполагается, что сцена приведена к серому с коэффициентом отражения 0.2).

Для того чтобы включить в модель палочковые ответы, необходимы данные о скотопических яркостях (еще одна уникальная особенность хантовской модели), то есть, в частности, сведения о скотопической яркости адаптирующего поля (cd/m^2). Поскольку скотопические данные встречаются редко, приблизи-

---

[1] Обращаем внимание читателя на то, что в 6-м издании монографии Ханта «Цветовоспроизведение» хантовская модель цветового восприятия заменена моделью CIECAM97s (Хант, 2004).

тельную скотопическую яркость осветителя (L_{AS}) можно получить из его фотопической яркости (L_A) и коррелированной цветовой температуры (T), воспользовавшись уравнением 12.1:

$$L_{AS} = 2.26 L_A [(T / 4000) - 0.4)^{1/3} \quad (12.1)$$

Также необходимо знать отношение скотопической яркости исследуемого стимула к скотопической яркости эталонного белого, но поскольку и эти данные довольно редки, их обычно заменяют на отношение фотопической яркости образца к скотопической яркости эталонного белого.

И наконец, существует ряд входных переменных, точно определяемых конфигурацией просмотра.

Первые две — это коэффициенты хроматической (N_c) и субъективнояркостной (N_b) индукций окружения. Поскольку чаще всего и эти данные недоступны, Хант (1995) предложил использовать ряд конкретных значений, оптимизированных для специфических просмотровых ситуаций (таблица 12.1).

Таблица 12.1 Коэффициенты хроматической и субъективнояркостной индукций окружения

СИТУАЦИЯ	N_c	N_b
Малые области с однородными окружениями и на однородных фонах	1.0	300
Обычные сцены	1.0	75
Телевидение и CRT-дисплеи в тусклом окружении	1.0	25
Крупноформатные слайды в промостровых устройствах	0.7	25
Проекционный показ слайдов в темном окружении	0.7	10

Вторая пара переменных — коэффициенты хроматической (N_{cb}) и субъективнояркостной (N_{bb}) индукций фона. И снова Хант предлагает оптимизированные значения: учитывая то, что требуемые величины недоступны, коэффициенты хроматической и субъективнояркостной индукций фона вычисляются из фотометрической яркости эталонного белого (Y_W) и яркости фона (Y_b) (уравнения 12.2 и 12.3):

$$N_{cb} = 0.725 (Y_W / Y_b)^{0.2} \quad (12.2)$$

$$N_{bb} = 0.725 (Y_W / Y_b)^{0.2} \quad (12.3)$$[1]

Последнее, с чем необходимо определиться, — это имеет ли место когнитив-

[1] Правые части уравнений 12.2 и 12.3 одинаковы, из чего следует, что $N_{cb} = N_{bb}$. Последнее сомнительно, поскольку в этом случае уравнение было бы одиночным и записывалось бы так: $N_{cb} = N_{bb} = 0.725 (Y_W / Y_b)^{0.2}$. Однако, по уверению автора книги, эти уравнения в точности соответствуют хантовской формулировке. — *Прим. пер.*

ное обесцвечивание осветителя или нет (некоторые параметры модели меняют свое значение в ситуациях, когда такая поправка возникает).

Получив все вышеописанные данные, можно продолжать вычисление параметров хантовской модели.

12.3 МОДЕЛЬ АДАПТАЦИИ

Первый шаг в работе всех моделей, описанных в нашей книге, — это преобразование CIE-трехстимульных значений в колбочковые ответы. В хантовской модели колбочковые ответы поименованы как ργβ (а не как *LMS*). Преобразование Ханта — Поинтера — Эстевец, использованное также в модели Наятани и RLAB-модели, выполняется по уравнению 12.4 и нормировано так, что равноэнергетический осветитель имеет равные величины ργβ:

$$\begin{vmatrix}\rho\\ \gamma\\ \beta\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}0.38971 & 0.68898 & -0.07868\\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641\\ 0.0 & 0.0 & 1.0\end{vmatrix}\begin{vmatrix}X\\ Y\\ Z\end{vmatrix} \qquad (12.4)$$

Преобразование *XYZ* в ργβ-значения должно быть выполнено для эталонного белого, фона, проксимального поля и исследуемого стимула.

Модель хроматической адаптации, интегрированная в хантовскую модель цветового восприятия, — это серьезно переработанная фонкризовская гипотеза: адаптированные колбочковые сигналы $\rho_a\gamma_a\beta_a$ рассчитываются из колбочковых ответов на стимул (ργβ) и эталонный белый $\rho_W\gamma_W\beta_W$ (уравнения 12.5–12.7):

$$\rho_a = B_\rho\left[f_n(F_L F_\rho \rho/\rho_W) + \rho_D\right] + 1 \qquad (12.5)$$

$$\gamma_a = B\gamma\left[f_n(F_L F_\gamma \gamma/\gamma_W) + \gamma_D\right] + 1 \qquad (12.6)$$

$$\beta_a = B_\beta\left[f_n(F_L F_\beta \beta/\beta_W) + \beta_D\right] + 1 \qquad (12.7)$$

Фонкризовское «сердце» данных уравнений — это отношения ρ/ρ_W, γ/γ_W и β/β_W, но, разумеется, в уравнениях 12.5–12.7 есть множество других параметров, требующих определения и объяснения (см. ниже).

Первое — это $f_n()$ — общая гиперболическая функция (уравнение 12.8), используемая для моделирования нелинейного поведения различных визуальных ответов:

$$f_n[I] = 40[I^{0.73}/(I^{0.73}+2)] \qquad (12.8)$$

Рис. 12.1 демонстрирует форму хантовской нелинейной функции в логарифмических осях. Отметим, что в центральном рабочем диапазоне функция линейна и, следовательно, эквивалентна простой степенной функции (в дан-

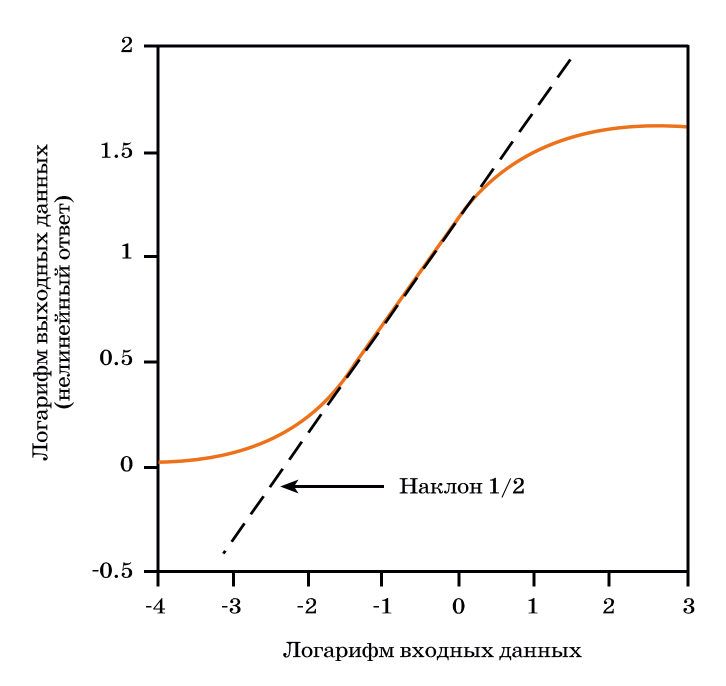


Рис. 12.1 Функция нелинейного ответа $f_n()$ хантовской модели цветового восприятия.

ном случае степень равна 1/2). Хантовская функция имеет то преимущество, что моделирует пороговое поведение зрительной системы на низких уровнях фотометрической яркости (постепенное увеличение наклона) и восприятие чистоты цвета на высоких уровнях (снижение наклона назад к нолю). Такая нелинейность необходима для моделирования работы зрительной системы в большом диапазоне уровней яркости (на которые и рассчитана модель Ханта).

F_L — это т.н. коэффициент адаптации по фотопической яркости, интегрированный в хантовское CAT для прогноза общего поведения световой адаптации в широком диапазоне уровней фотометрической яркости. F_L вычисляется по формулам 12.9 и 12.10 (в которых вновь задействован абсолютный уровень фотометрической яркости, что позволяет прогнозировать такие феномены восприятия, как эффект Стивенса и эффект Ханта):

$$F_L = 0.2k^4(5L_A) + 0.1(1-k^4)^2(5L_A)^{1/3} \tag{12.9}$$

$$k = 1/(5L_A + 1) \tag{12.10}$$

F_ρ, F_γ и F_β — факторы хроматической адаптации, введенные для моделирования ее возможной неполноты. Эти коэффициенты рассчитаны так, что хроматическая адаптация всегда является полной при равноэнергетическом осветителе (иногда называемом E-осветителем), то есть модель предполагает, что E-осветитель всегда воспринимается ахроматичным, и, следовательно, F_ρ, F_γ и F_β при нем равны единице. Такое допущение подтверждается результатами экспериментов, проведенных Гурвичем и Джеймсоном (1951), Хантом и Винтером (1975), а также Фершильдом (1991).

Если F_ρ, F_γ и F_β отклоняются от единицы (в большую или в меньшую стороны — зависит от цвета адаптирующего поля), это означает, что прогнозируется та или иная степень неполноты хроматической адаптации.

Формулы вычисления F_ρ, F_γ и F_β даны в уравнениях 12.11–12.16, а поведение их функций проиллюстрировано рис. 12.2 на примере F_ρ.

$$F_\rho = (1 + L_A^{1/3} + h_\rho)/(1 + L_A^{1/3} + 1/h_\rho) \tag{12.11}$$

$$F_\gamma = (1 + L_A^{1/3} + h_\gamma)/(1 + L_A^{1/3} + 1/h_\gamma) \tag{12.12}$$

$$F_\beta = (1 + L_A^{1/3} + h_\beta)/(1 + L_A^{1/3} + 1/h_\beta) \tag{12.13}$$

$$h_\rho = 3\rho_W/(\rho_W + \gamma_W + \beta_W) \tag{12.14}$$

$$h_\gamma = 3\gamma_W/(\rho_W + \gamma_W + \beta_W) \tag{12.15}$$

$$h_\beta = 3\beta_W/(\rho_W + \gamma_W + \beta_W) \tag{12.16}$$

О переменных h_ρ, h_γ и h_β можно говорить как о координатах цветности, шкалированных относительно Е-осветителя (поскольку $\rho\gamma\beta$ уже сами по себе нормированы на него): при Е-осветителе $h_\rho = h_\gamma = h_\beta = 1.0$, но по мере роста чистоты цвета эталонного белого они все больше отклоняются от единицы. Данные параметры, суммированные с кубическим корнем абсолютной фотометрической яркости (уравнения 12.11–12.13), дают некие величины, не равные 1.0 и растущие по мере ухода цветности эталонного белого от цветности Е-осветителя (рост чистоты цвета источника), а также по мере роста адаптирующей яркости. Рост полноты хроматической адаптации по мере роста адаптирующей яркости также подтвержден визуальными экспериментами. Общую тенденцию иллюстрирует рис. 12.2, на котором показано семейство кривых, относящихся к разным уровням адаптирующей яркости.

Если возникает когнитивное обесцвечивание осветителя, то хроматическая адаптация берется как полная,и, соответственно, F_ρ, F_γ и F_β равны единице.

Переменные ρ_D, γ_D и β_D включены в модель с целью прогнозирования эффекта Хельсона — Джадда, что достигается путем принудительного искажения колбочковых сигналов, зависимых от взаимоотношений между фотометрическими яркостями фона (Y_b), эталонного белого (Y_W) и исследуемого стимула (уравнения 12.17–12.19):

$$\rho_D = f_n[(Y_b/Y_W)F_L F_\gamma] - f_n[(Y_b/Y_W)F_L F_\rho] \tag{12.17}$$

$$\gamma_D = 0.0 \tag{12.18}$$

$$\beta_D = f_n[(Y_b/Y_W)F_L F_\gamma] - f_n[(Y_b/Y_W)F_L F_\beta] \tag{12.19}$$

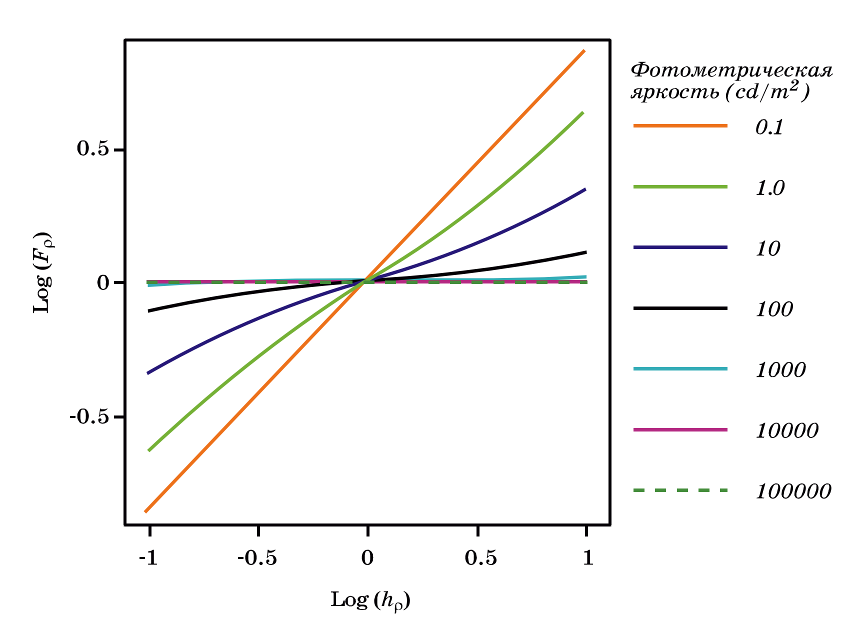


Рис. 12.2 Один из коэффициентов хроматической адаптации (F_{ρ}), вычерченный как функция от цветности адаптирующего стимула при различных уровнях его фотометрической яркости. Данная функция иллюстрирует то, что адаптация становится менее полной (F_{ρ} удаляется от 1.0) по мере роста хроматичности адаптирующего стимула (h_{ρ} удаляется от 1.0) и/или по мере снижения уровня его яркости.

Эффект Хельсона — Джадда не возникает в заурядных просмотровых ситуациях (Хельсон, 1938), поэтому при обычных условиях просмотра переменные ρ_D, γ_D и β_D должны устанавливаться на 0.0. Также эффект Хельсона — Джадда не проявляет себя, когда имеет место когнитивное обесцвечивание осветителя — в этих случаях переменные ρ_D, γ_D и β_D тоже приводятся к 0.0, поскольку F_{ρ}, F_{γ} и F_{β} должны быть приравнены к 1.0. Однако существуют ситуации, когда, наряду с тем, что ρ_D, γ_D и β_D устанавливаются на 0.0, желательно располагать истинными значениями F_{ρ}, F_{γ} и F_{β} (проекционный просмотр слайдов в темном окружении или просмотр изображений на CRT-дисплеях).

Последние коэффициенты в формулах хроматической адаптации (уравнения 12.5–12.7) — это коэффициенты колбочкового ослепления (cone bleach factors) — B_{ρ}, B_{γ} и B_{β}. Отметим, что эти коэффициенты необходимы для моделирования зрительных ответов только в экстремально большом диапазоне уровней яркости: коэффициенты моделируют процесс истощения фотопигмента (то есть, ослепления), возникающего на очень высоких уровнях яркости, в результате чего фоторецепторная чувствительность падает (уравнения 12.20–12.22):

$$B_{\rho} = 10^7 / [10^7 + 5L_A(\rho_W / 100)] \tag{12.20}$$

$$B_{\gamma} = 10^7 / [10^7 + 5L_A(\gamma_W / 100)] \tag{12.21}$$

$$B_{\beta} = 10^7 / [10^7 + 5L_A(\beta_W / 100)] \tag{12.22}$$

Коэффициенты колбочкового ослепления равны 1.0 для большинства обычных уровней фотометрической яркости. Когда адаптирующая яркость (L_A) выходит на экстремально высокие уровни, коэффициенты ослепления начинают снижаться (в результате чего снижается адаптированный колбочковый ответ). Когда адаптирующая яркость стремится к бесконечности — предел коэффициентов ослепления стремится к нулю, то есть: когда рецепторы оказываются полностью ослепленными (т.н. ретинальный ожог) — колбочковый ответ исчезает. Слепящие уровни яркости весьма опасны для наблюдателя и всегда наносят ущерб здоровью, однако коэффициенты ослепления начинают работать уже на тех уровнях фотометрической яркости, которые ниже порога ретинального ожога, например в солнечный день на открытом воздухе. В таких ситуациях мы наблюдаем снижение зрительного ответа из-за того, что «слишком ярко», поэтому, для того чтобы получить типичный ответ, нужно надеть солнцезащитные очки.

Отметим, что описанные уровни фотометрической яркости не встречаются в сфере репродуцирования изображений (кроме, пожалуй, некоторых оригинальных сцен).

Завершает формулы адаптации добавка 1.0, имитирующая шум в зрительной системе.

Если проксимальное поле и фон отличны от серого, то путем управления колбочковыми сигналами моделируется хроматическая индукция для эталонного белого, также задействованного в формулах адаптации. Моделирование хроматической индукции выполняется исходя из предположения, что на статус адаптации влияет не только цвет эталонного белого, но и локальные цвета проксимального поля и фона. Отметим, что данный тип моделирования никак не противоречит наблюдаемым зрительным феноменам.

В 1991 г. Хант предложил один из алгоритмов расчета сигналов, нормированных по эталонному белому (ρ'_W, γ'_W и β'_W), из колбочковых ответов по фону (ρ_b, γ_b и β_b) и по проксимальному полю (ρ_p, γ_p и β_p):

$$\rho'_W = \frac{\rho_W [(1-p)p_\rho + (1+p)/p_\rho]^{1/2}}{[(1+p)p_\rho + (1-p)/p_\rho]^{1/2}} \tag{12.23}$$

$$\gamma'_W = \frac{\gamma_W [(1-p)p_\gamma + (1+p)/p_\gamma]^{1/2}}{[(1+p)p_\gamma + (1-p)/p_\gamma]^{1/2}} \tag{12.24}$$

$$\beta'_W = \frac{\beta_W [(1-p)p_\beta + (1+p)/p_\beta]^{1/2}}{[(1+p)p_\beta + (1-p)/p_\beta]^{1/2}} \tag{12.25}$$

$$p_\rho = (\rho_p / \rho_b) \tag{12.26}$$

$$p_\gamma = (\gamma_p / \gamma_b) \tag{12.27}$$

$$p_\beta = (\beta_p / \beta_b) \tag{12.28}$$

где *p* лежит в диапазоне от 0 до −1 в случае возникновения симультанного контраста и в диапазоне от 0 до +1 в случае ассимиляции. Однако в большинстве практических ситуаций фон и проксимальное поле предполагаются ахроматичными и уравнения 12.23–12.25 не используются.

Итак, коль скоро в нашем распоряжении имеются адаптированные колбочковые сигналы (ρ_a, γ_a и β_a), у нас появляется возможность переходить к оппонентным ответам, а затем и к коррелятам цветового восприятия.

Палочковые ответы будут рассмотрены на этапе их внедрения в ахроматический ответ.

12.4 ОППОНЕНТНЫЕ ЦВЕТОВЫЕ РАЗМЕРНОСТИ

Когда адаптированные колбочковые сигналы (ρ_a, γ_a и β_a) известны, оппонентные зрительные ответы легко вычислить по формулам 12.29–12.32:

$$A_a = 2\rho_a + \gamma_a + (1/20)\beta_a - 3.05 + 1 \tag{12.29}$$

$$C_1 = \rho_a - \gamma_a \tag{12.30}$$

$$C_2 = \gamma_a - \beta_a \tag{12.31}$$

$$C_3 = \beta_a - \rho_a \tag{12.32}$$

где:

— A_a — ахроматический постадаптационный сигнал, представленный как сумма колбочковых ответов, взятых с учетом относительной заселенности сетчатки;

— вычитание 3.05 и добавка 1.0 представляют соответственно удаление ранних шумовых компонентов и добавку новых;

— C_1, C_2 и C_3 — представляют все возможные хроматические оппонентные сигналы, которые могут возникнуть в сетчатке. Переменные могут иметь (а могут и не иметь) прямой физиологический коррелят, но в любом случае ими удобно пользоваться для построения традиционных оппонентных ответов, описанных ниже.

12.5 ЦВЕТОВОЙ ТОН

В хантовской модели цветового восприятия угол цветового тона вычисляется так же, как и в других моделях: красно-зеленые и желто-синие оппонентные размерности специфицированы как соответствующие комбинации цветоразностных сигналов, описываемых уравнениями 12.30–12.32. Угол цветового тона (h_s) вычисляется по формуле 12.33:

$$h_s = \tan^{-1}\left[\frac{(1/2)(C_2 - C_3)/4.5}{C_1 - (C_2/11)}\right] \tag{12.33}$$

На основе h_s вычисляется квадратура цветового тона (H), рассчитываемая путем интерполяции специфических углов однозначных цветовых тонов при переменном коэффициенте оригинальности (e_S). Функция интерполяции дана в уравнении 12.33 (а):

$$H = H_1 + \frac{100[(h_s - h_1)/e_1]}{[(h_s - h_1)/e_1 + (h_2 - h_s)/e_2]} \quad (12.33\,[a])$$

где:

— H_1 определен как 0, 100, 200 или 300 (в зависимости от того, является ли соответственно красный, желтый, зеленый или синий однозначным цветовым тоном с ближайшим меньшим углом к углу цветового тона исследуемого образца);

— величины h_1 и e_1 берутся из таблицы 12.2 как значения для однозначного цветового тона, имеющего наименьшее ближайшее значение к h_s, в то время как h_2 и e_2 берутся как значения однозначного цветового тона, имеющего наибольшее ближайшее значение к h_s.

Таблица 12.2 Углы (h_s) и коэффициенты оригинальности (e_s) однозначных цветовых тонов

ЦВЕТОВОЙ ТОН	h_s	e_s
Красный	20.14	0.8
Желтый	90.00	0.7
Зеленый	164.25	1.0
Синий	237.53	1.2

Состав цветового тона H_C (также как и в модели Наятани, описанной в 11-й главе) вычисляется непосредственно из квадратуры цветового тона. Состав цветового тона выражается как процент от двух однозначных цветовых тонов, слагающих цветовой тон исследуемого стимула.

Наконец, путем линейной интерполяции, с использованием величины угла цветового тона (h_s) исследуемого стимула и данных из таблицы 12.2, рассчитывается коэффициент оригинальности (e_s), используемый в дальнейших вычислениях коррелятов восприятия.

12.6 ЧИСТОТА ЦВЕТА

Шагом к расчету коррелята чистоты цвета является вычисление желто-синего и красно-зеленого ответов из цветоразностных сигналов (уравнения 12.34 и 12.35):

$$M_{YB} = 100[(1/2)(C_2 - C_3)/4.5][e_S(10/13)N_c N_{cb} F_t] \quad (12.34)$$

$$M_{RG} = 100[C_1 - (C_2/11)][e_S(10/13)N_c N_{cb}] \quad (12.35)$$

где:

— константы уравнений 12.34 и 12.35 — это простые шкалирующие коэффициенты;

— N_c и N_{cb} — хроматические индукции окружения и фона (рассчитываются заранее);

— F_t — низкояркостный тританопический коэффициент, вычисляемый по уравнению 12.36:

$$F_t = L_A(L_A + 0.1) \tag{12.36}$$

Низкояркостная тританопия — это феномен, при котором наблюдатели с нормальным цветовым зрением по мере снижения фотометрической яркости становятся все более и более тританопичными (желто-синяя недостаточность), поскольку яркостный порог для S-колбочек выше, чем для L- и M-колбочек. Как видно из уравнения 12.36, F_t равен 1.0 для большинства типичных уровней фотометрической яркости; когда адаптирующая яркость (L_A) стремится к нолю — F_t тоже стремится к нолю, что ведет к снижению желто-синего ответа на низких уровнях яркости.

Общий хроматический ответ (M) рассчитывается как корень квадратный из суммы квадратов желто-синего и красно-зеленого ответов, описанных выше (уравнение 12.37):

$$M = \sqrt{(M_{YB}^2 + M_{RG}^2)} \tag{12.37}$$

Наконец, чистота цвета (s) рассчитывается из M и адаптированных колбочковых сигналов по формуле 12.38. Данный расчет выполняется согласно определению чистоты цвета (отношение полноты цвета стимула к его субъективной яркости): общий хроматический ответ M (аппроксимирующий полноту цвета) делится на сумму адаптированных колбочковых сигналов (аппроксимирующих субъективную яркость).

$$s = 50M / (\rho_a + \gamma_a + \beta_a) \tag{12.38}$$

12.7 СУБЪЕКТИВНАЯ ЯРКОСТЬ

Для получения коррелятов субъективной яркости и светлоты понадобятся дополнительные манипуляции с ахроматическими сигналами.

Вспомним, что хантовская модель цветового восприятия построена в расчете на полный диапазон уровней фотометрической яркости и, следовательно, должна включать в себя ответ палочковых фоторецепторов, которые активны на низких уровнях яркости.

Палочковый ответ внедрен в ахроматический сигнал (последний влияет на прогноз насыщенности и полноты цвета). Палочковый ответ после адаптации (A_S) рассчитывается по формуле 12.39. Подстрочный индекс «S» — это пер-

вая литера слова «scotopic» (скотопический), употребляемого в отношении зрения, работающего на низких уровнях яркости (при которых доминируют палочковые ответы):

$$A_S = 3.05 B_S [f_n (F_{LS} S / S_W)] + 0.3 \quad (12.39)$$

где:

— для моделирования скотопического ответа также задействована общая гиперболическая функция $f_n()$ (уравнение 12.8);

— расчет адаптированных палочковых сигналов аналогичен расчету адаптированных колбочковых сигналов, описанных ранее (уравнения 12.5–12.7). Ядром расчета является шкалирование фонкризовского типа, при котором скотопический ответ по исследуемому стимулу (S) относят к скотопическому ответу по эталонному белому (S_W);

— значение «3.05» — шкалирующий фактор;

— значение «0.3» — уровень шума; величина 0.3 (а не 1.0) выбрана потому, что палочки чувствительнее колбочек;

— F_{LS} — коэффициент адаптации по скотопической яркости, рассчитываемый по уравнениям 12.40 и 12.41 (подобны формулам расчета колбочкового коэффициента адаптации по фотопической яркости).

$$F_{LS} = 3800 j^2 (5L_{AS} / 2.26) + 0.2(1 - j^2)^4 (5L_{AS} / 2.26)^{1/6} \quad (12.40)$$

$$j = 0.00001 / [(5L_{AS} / 2.26) + 0.00001] \quad (12.41)$$

— B_S — коэффициент палочкового ослепления. Добавлен для моделирования снижения вклада палочек в общее цветовое восприятие при повышении уровня фотометрической яркости. B_S рассчитывается по формуле 12.42:

$$B_S = 0.5 / \left\{1 + 0.3[(5L_{AS} / 2.26)(S / S_W)]^{0.3}\right\} + 0.5 / \left\{1 + 5[5L_{AS} / 2.26]\right\} \quad (12.42)$$

Анализ коэффициента палочкового ослепления в сравнении с коэффициентом колбочкового ослепления (уравнения 12.2–12.22) свидетельствует о том, что палочки насыщаются и их ответ существенно снижается на достаточно низких уровнях фотометрической яркости.

Взяв ахроматический колбочковый сигнал (A_a) из уравнения 12.29, адаптированный скотопический сигнал (A_S) из уравнения 12.39 и коэффициент субъективнояркостной индукции фона (определяется отдельно), высчитываем общий ахроматический сигнал (A) (уравнение 12.43):

$$A = N_{bb} [A_a - 1 + A_S - 0.3 + (1^2 + 0.3^2)^{1/2}] \quad (12.43)$$

Все константы уравнения 12.43 представляют собой удаление старых шумовых поправок с последующим введением новых (исправленных) через сумму квадратов.

Для вычисления коррелята субъективной яркости (Q) ахроматический сигнал (A) комбинируется с общим хроматическим сигналом (M) (уравнение 12.44):

$$Q = \{7[A + (M / 100)]\}^{0.6} N_1 - N_2 \qquad (12.44)$$

Мы видим, что коррелят субъективной яркости (Q) зависит как от ахроматического (A), так и от хроматического (M) ответов, что позволяет моделировать эффект Гельмгольца — Кольрауша. Кроме того, уравнение 12.44 содержит две переменных N_1 и N_2, учитывающих влияние окружения на субъективную яркость (к примеру, эффекты Стивенса и Бартлесона — Бренемана, обсуждавшиеся в гл. 6). Переменные N_1 и N_2 вычисляются посредством формул 12.45 и 12.46 из ахроматического сигнала по эталонному белому (A_W) и коэффициента субъективнояркостной индукции окружения N_b (также определяемого отдельно):

$$N_1 = (7A_W)^{0.5} / (5.33N_b^{0.13}) \qquad (12.45)$$

$$N_2 = 7A_W N_b^{0.362} / 200 \qquad (12.46)$$

Отметим, что если необходимы данные об ахроматическом сигнале по эталонному белому (A_W), то вдобавок к вычислениям по исследуемому стимулу все вышеописанные математические операции нужно выполнить и по эталонному белому, а для дальнейших уравнений потребуется вычисление и его субъективной яркости (Q_W).

Модель Ханта позволяет рассчитать субъективную яркость в логике белизны-черноты (Q_{WB}). Данная биполярная величина (подобная Q-величине из модели Наятани) иллюстрирует то, что при повышении уровня адаптирующей яркости черные объекты выглядят темнее, а белые — белее (альтернативное толкование эффекта Стивенса). Q_{WB} рассчитывается по уравнению 12.47 с использованием субъективной яркости фона:

$$Q_{WB} = 20(Q^{0.7} - Q_b^{0.7}) \qquad (12.47)$$

12.8 СВЕТЛОТА

Коррелят светлоты в хантовской модели цветового восприятия обозначается как «J» и вычисляется из субъективной яркости исследуемого стимула (Q) и субъективной яркости эталонного белого (Q_W) по уравнению 12.48:

$$J = 100(Q / Q_W)^z \qquad (12.48)$$

Данная формулировка светлоты в целом соответствует определению CIE, в котором светлота — это отношение субъективной яркости исследуемого стимула к субъективной яркости эталонного белого. Для моделирования воздейст-

вия относительной фотометрической яркости фона на ощущение светлоты данное соотношение возводится в степень «z», рассчитываемую по уравнению 12.49. Когда фон становится светлее, величина «z» повышается, это говорит о том, что темный стимул на светлом фоне будет восприниматься темнее, нежели на темном (эффект симультанного светлотного контраста).

$$z = 1 + (Y_b / Y_W)^{1/2} \qquad (12.49)$$

12.9 НАСЫЩЕННОСТЬ

Насыщенность (C_{94}) в хантовской модели выводится из чистоты цвета (s) и относительной субъективной яркости (приблизительной светлоты) на основании общего определения насыщенности (см. гл. 4), согласно которому насыщенность может быть представлена как отношение чистоты цвета к светлоте. Точную формулировку дает уравнение 12.50:

$$C_{94} = 2.44 s^{0.69} (Q / Q_W)^{Y_b / Y_W} (1.64 - 0.29^{Y_b / Y_W}) \qquad (12.50)$$

Уравнение 12.50 демонстрирует, что насыщенность зависит от относительной субъективной яркости стимула Q/Q_W и от относительной яркости фона Y_b/Y_W. Такая формулировка насыщенности получена эмпирическим путем на основе результатов серии экспериментов по шкалированию восприятия (Хант, 1994; Хант и Луо, 1994).

12.10 ПОЛНОТА ЦВЕТА

Зная насыщенность, полноту цвета можно определить путем факторизации субъективной яркости, что в модели Ханта реализовано умножением C_{94} на коэффициент адаптации по фотопической яркости (F_L), возведенный в степень 0.15 (уравнение 12.15):

$$M_{94} = F_L^{0.15} C_{94} \qquad (12.51)$$

Таким образом, в Хантовской модели M_{94} — это коррелят полноты цвета, также полученный эмпирически, путем анализа результатов визуального шкалирования.

12.11 ОБРАТНАЯ МОДЕЛЬ

К сожалению, из-за своей сложности полноценная хантовская модель цветового восприятия не может быть аналитически инвертирована. Проблема усугубляется, когда на входе обратной модели присутствуют только светлота, насыщенность и цветовой тон (что чаще всего и бывает). Вместе с тем, многим отраслям промышленности, ориентированным на репродуцирование изобра-

жений, требуется двунаправленная модель. Поскольку невозможность аналитической инверсии хантовской модели создает определенные трудности в ее применении, Хант (1995) дал на сей счет ряд разъяснений:

В большинстве случаев модель легко инвертировать, если задействованы все корреляты восприятия, а не только три упомянутых.

Одним из альтернативных вариантов использования модели является отказ от учета скотопического компонента, что упрощает процесс инверсии (внедрение скотопического ответа в расчет перцепционных величин — это одна из особенностей модели, препятствующая ее аналитической инверсии). Когда скотопический компонент игнорируется, предикторы модели слегка меняются, но это отличие в большинстве случаев несущественно. В 1995 г. Хант показал, что данный метод можно использовать, если фотометрическая яркость эталонного белого превышает 10 cd/m^2, то есть в большинстве ситуаций оценки цветовых репродукций.

Прочие приемы, предложенные Хантом для некоторых частей обратной модели, требуют применения метода последовательных приближений. В большинстве случаев проще использовать последовательные приближения для всей модели целиком, повторяя итерации до тех пор, пока не будут получены соответствующие выходные трехстимульные значения, дающие необходимые корреляты восприятия. Данный метод может быть реализован, к примеру, с помощью оптимизации по Ньютону — Рафсону (фактически — это единственный вариант), которую можно задействовать, когда доступны лишь светлота, насыщенность и цветовой тон.

Метод последовательных приближений при большом числе данных (к примеру, при работе с изображениями) весьма трудоемок, но этот недостаток преодолим путем использования в прямой и обратной моделях трехмерных таблиц соответствия (three-dimensional look-up tables), в которых для конверсии данных изображения применяется метод интерполяции. Таким образом, трудоемкий процесс инверсии модели сводится к тому, что по каждому из условий просмотра один раз строится таблица соответствия. Такой подход оправдан, но если пользователь хочет работать в разных условиях просмотра, то всякий раз, прежде чем воспроизвести изображение, ему придется подолгу ждать, пока изображение будет пересчитано по таблице соответствия. Задержка может быть весьма серьезной, что делает хантовскую модель непрактичной в большинстве сфер ее возможного применения.

Работу модели Ханта имеет смысл рассмотреть пошагово. Шаги прямой (и если возможно, то обратной) работы модели следующие:

1. Получение физических данных и выбор прочих параметров.
2. Вычисление колбочковых возбуждений $\rho\gamma\beta$ по различным стимульным полям.
3. Вычисление относительных колбочковых возбуждений.
4. Вычисление коэффициента адаптации по фотопической яркости (F_L).
5. Вычисление коэффициентов хроматической адаптации (F_ρ, F_γ, F_β).
6. Вычисление параметров эффекта Хельсона-Джадда (ρ_D, γ_D, β_D).
7. Вычисление адаптированных колбочковых сигналов (ρ_a, γ_a, β_a).

8. Вычисление ахроматического (A_a) и цветоразностного (C_1, C_2, C_3) сигналов.
9. Вычисление угла цветового тона (h_s).
10. Вычисление квадратуры цветового тона (H).
11. Вычисление состава цветового тона (H_C).
12. Вычисление коэффициента оригинальности (e_S).
13. Вычисление низкояркостного тританопического коэффициента (F_t).
14. Вычисление хроматических ответов (M) и чистоты цвета (s).
15. Вычисление коэффициента адаптации по скотопической яркости (F_{LS}).
16. Вычисление скотопического ответа (A_S).
17. Вычисление полного ахроматического ответа (A).
18. Вычисление субъективной яркости (Q).
19. Вычисление светлоты (J).
20. Вычисление насыщенности (C_{94}).
21. Вычисление полноты цвета (M_{94}).
22. Вычисление белизны-черноты (Q_{WB}).

Хантовская модель цветового восприятия — это самая сложная модель из семейства традиционных моделей, описанных в нашей книге. Однако существует ряд методов, позволяющих существенно упростить ее программное исполнение и радикально повысить скорость вычислений. Один из них — это предварительный последовательный проход по всей модели с вычислением всех параметров, константных в данных условиях просмотра. В первую очередь сказанное касается коэффициентов адаптации и перцепционных коррелятов эталонного белого. Все предварительные данные используются в дальнейших вычислениях, что дает возможность каждый раз не пересчитывать значения по каждому стимулу (или пикселу) изображения. Такой подход может быть весьма практичен при обсчете данных изображения (или таблиц соответствия), где вычисления повторяются миллионы раз. Во-вторых: многие из уравнений, например, уравнение ахроматического ответа A (формула 12.43), включают в себя операции с константами, следовательно, количество вычислений можно уменьшить объединением всех констант в единое значение (с этой задачей справляются многие компиляторы), к примеру: $-1-0.3+(1^2+0.3^2)^{1/2}$ можно легко конвертировать в -0.2559.

12.12 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФЕНОМЕНОВ

Как было сказано ранее, хантовская модель цветового восприятия — это всеохватная и наиболее полная модель цветового восприятия, которая обладает следующими особенностями:

— модель создана для прогнозирования восприятия стимула (находящегося на разных фонах и в разных окружениях) в диапазоне его фотометрических яркостей от абсолютного порога зрительной системы до колбочкового ослепления;

— модель можно использовать в отношении неизолированных и изолированных цветовых стимулов (о работе в отношении изолированных стимулов см. у Ханта [1991]);

— прогнозируется широкий диапазон феноменов: эффекты Эбнея, Ханта, Гельмгольца — Кольрауша, Стивенса, Бартлесона — Бренемана, цветовой сдвиг Бецольда — Брюкке, симультанный контраст;

— прогнозируются изменения в цветовом восприятии, возникающие в результате световой адаптации, хроматической адаптации и когнитивного обесцвечивания осветителя;

— модель уникальна тем, что учитывает вклад палочковых фоторецепторов в цветовое восприятие.

Хантовская модель учитывает большое количество зрительных феноменов, что делает ее весьма сложной (и это естественно, ведь зрительная система очень сложна) и затрудняет ее использование во многих целевых отраслях.

Четыре примера вычислений с использованием хантовской модели цветового восприятия даны в таблице 12.3: значения высчитаны при условии, что проксимальное поле и фон имеют коэффициент фотометрической яркости 20% и ахроматичны, то есть их цветность равна цветности источника; коэффициент фотометрической яркости эталонного белого — 100%, а его цветность также равна цветности источника; скотопический компонент высчитан по формулам, описанным в текущей главе; эффект Хельсона — Джадда взят равным 0.0.

12.13 ПОЧЕМУ НЕ ТОЛЬКО МОДЕЛЬ ХАНТА?

Казалось бы, хантовская модель цветового восприятия самодостаточна и способна делать все, «чего душа пожелает». Однако почему она не принята в качестве единого стандарта? — Потому что оборотной стороной самодостаточности модели Ханта является ее сложность, которая делает ее использование на практике как минимум затруднительным, а как максимум — невозможным. При этом сложность модели позволяет ей быть чрезвычайно гибкой и, как будет показано в 15-й главе, в целом она способна к точному прогнозированию в широком диапазоне визуальных экспериментов и использовать ее можно в разных ситуациях.

Ясно, что точность прогнозов и гибкость — это лучшие качества хантовской модели. Однако очень часто остается непонятным, как именно применять модель (то есть выбрать соответствующие значения параметров) до получения визуальных данных. В некоторых случаях параметры должны быть не просто выбраны, но еще и оптимизированы к тем или иным специфическим условиям просмотра, если есть такая возможность. Однако если такой возможности нет и приходится использовать модель, что называется, «по номиналу», то есть с рекомендуемыми параметрами, то хантовская система может сработать очень плохо (см. гл. 15). Так происходит потому, что номинальные параметры модели по данным условиям просмотра используются для прогноза в том числе и специфических феноменов, которые могут быть (а могут и не быть) важны в данной конкретной ситуации. Правда, возможна регулировка post factum, но она может оказаться запоздалой. Таким образом, если невозможно оптимизировать (или оптимально употребить) работу хантовской модели, точность ее предикторов может оказаться ниже, чем у более скромных моделей.

Таблица 12.3 Примеры вычислений по модели Ханта

Величина	Пример 1	Пример 2	Пример 3	Пример 4
X	19.01	57.06	3.53	19.01
Y	20.00	43.06	6.56	20.00
Z	21.78	31.96	2.14	21.78
X_W	95.05	95.05	109.85	109.85
Y_W	100.00	100.00	100.00	100.00
Z_W	108.88	108.88	35.58	35.58
L_A	318.31	31.83	318.31	31.83
N_c	1.0	1.0	1.0	1.0
N_b	75	75	75	75
Когн. обесцв. осветителя	Да	Да	Да	Да
h_S	269.3	18.6	178.3	262.8
H	317.2	398.8	222.2	313.4
H_C	83*B* 17*R*	99*R* 1*B*	78*G* 22*B*	87*B* 13*R*
s	0.03	153.36	245.40	209.29
Q	31.92	31.22	18.90	22.15
J	42.12	66.76	19.56	40.27
C_{94}	0.16	63.89	74.58	73.84
M_{94}	0.16	58.28	76.33	67.35

Следующий негативный момент: модель трудно инвертируема (что накладно в вычислительном плане и требует от пользователя серьезных знаний).

И последнее: для прогнозирования изменений в контрасте при изменении относительной яркости окружения хантовская модель использует некие дополнительные поправочные функции. В ряде случаев эти функции на выходе могут дать предикторы с отрицательными трехстимульными значениями.

13 RLAB-МОДЕЛЬ

Описанием RLAB-модели мы завершаем разговор о некоторых наиболее распространенных моделях цветового восприятия, созданных до 1997 года, когда была принята первая CIE-модель — CIECAM97s. Если хантовская модель и модель Наятани были созданы для предсказания атрибутов цветового восприятия в широком диапазоне условий просмотра, то RLAB была разработана исходя из иных соображений: RLAB создавалась как простая модель, способная к прогнозированию наиболее важных феноменов восприятия в сугубо практической обстановке. Целевой сферой применения RLAB является воспроизведение изображений на разных носителях (cross-media image reproduction), и в этих ситуациях модель весьма эффективна.

13.1 ЦЕЛИ И ПОДХОД

Корнями RLAB-модель уходит в исследования хроматической адаптации (Фершильд, 1990), моделирование хроматической адаптации (Фершильд, 1991), фундаментальную CIE-колориметрию (CIE, 1986) и практику репродуцирования изображений на различных носителях (Фершильд и Бернс, 1993; Фершильд, 1994).

Стартовой позицией RLAB явилось цветовое пространство CIELAB. Несмотря на то, что систему CIELAB в целом можно рассматривать как примитивную модель цветового восприятия, у нее имеется ряд серьезных ограничений: неточный расчет смены хроматической адаптации при переходе от одних условий просмотра к другим, отсутствие учета влияния уровня фотометрической яркости, отсутствие учета влияния окружения и полное безразличие к когнитивному обесцвечиванию осветителя. Эти и другие ограничения CIELAB весьма серьезно сказываются на ее практическом использовании. При создании модели RLAB недостатки CIELAB были преодолены: из CIELAB взяли все лучшее и добавили к нему ряд функциональных элементов.

CIELAB дает неплохую равномерность цветового восприятия при усредненных дневных осветителях, что иллюстрируют контуры цветового тона и насыщенности Манселловского атласа цветов, показанные на рис. 13.1: контуры весьма хороши, а в ряде случаев даже лучше, чем контуры, выдаваемые собственно моделями цветового восприятия. Однако, коль скоро CIELAB задействует «псевдофонкризовский» расчет с мены хроматической адаптации, удачные цветовые контуры моментально «разваливаются», стоит только осветителю начать удаляться от усредненного дневного света.

Концепция RLAB хороша тем, что при дневном свете модель дает контуры, весьма близкие к контурам CIELAB, но при этом у RLAB намного выше совместимость с «недневными» осветителями. Такого результата удалось добиться за счет объявления эталонными условий, при которых использовалось CIELAB

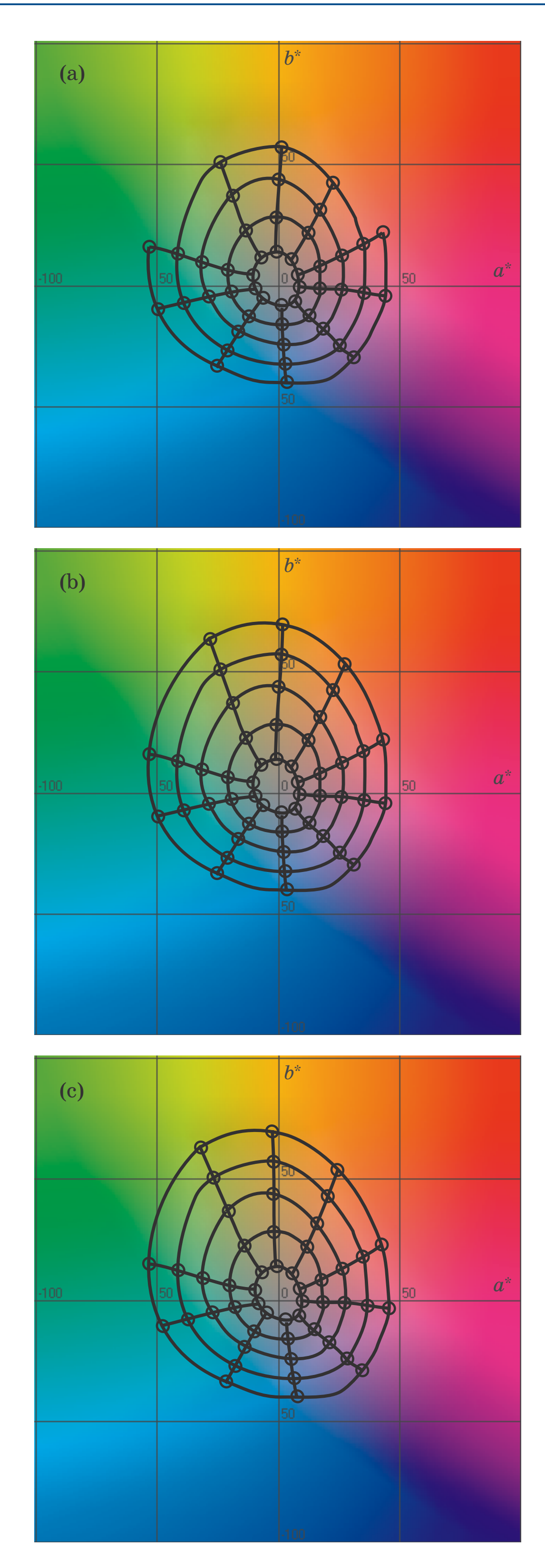


Рис. 13.1 Контуры постоянных манселловских цветового тона и насыщенности, вычерченные в CIELAB/RLAB-цветовом пространстве: (a) — манселловская светлота 3; (b) — манселловская светлота 5; (c) — манселловская светлота 7.

(осветитель D65, 318 cd/m², усредненное окружение, когнитивное обесцвечивание осветителя), а также за счет использования более точного расчета смены хроматической адаптации (Фершильд 1991, 1994, 1996) для определения согласованных цветовых стимулов между тестируемыми и эталонными условиями просмотра. Таким образом, в RLAB исходные трехстимульные значения вначале преобразовываются в трехстимульные значения согласованных цветовых стимулов при эталонных условиях просмотра, а затем для описания коррелятов восприятия используется модифицированное CIELAB-пространство.

Добавим, что нелинейная компрессия CIELAB (корень кубический) в RLAB приведена к функции от относительной фотометрической яркости окружения — такая манипуляция позволила прогнозировать снижение визуального контраста изображения по мере затемнения окружения (Бартлесон, 1975). Таким образом, усовершенствованный расчет смены хроматической адаптации и учет окружения расширили CIELAB по двум критичным для воспроизведения изображений направлениям.

RLAB была построена для прогнозирования только относительных атрибутов цветового восприятия, следовательно, модель может рассчитывать корреляты светлоты, насыщенности, чистоты цвета и цветового тона, но при этом не может прогнозировать субъективную яркость и полноту цвета. Данное ограничение было наложено для того, чтобы упростить модель настолько, насколько возможно, ведь прогнозирование субъективной яркости и полноты цвета в практике репродуцирования изображений не имеет большого значения.

То, что RLAB основана на CIELAB-пространстве весьма удобно: поскольку шкалы обеих систем идентичны, в RLAB можно практически с тем же успехом применять стандартные формулы цветовых отличий, такие, как CIELAB ΔE^*_{ab}(CIE, 1986), CMC (Кларк и колл., 1984) и CIE94 (CIE, 1995).

Более подробное описание RLAB-модели можно найти у Фершильда (1996).

13.2 ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Входные данные для RLAB-модели включают в себя относительные трехстимульные значения исследуемого стимула (XYZ), белой точки ($X_nY_nZ_n$), абсолютную фотометрическую яркость белого объекта сцены в cd/m², относительную фотометрическую яркость окружения (темное, тусклое, среднее), а также наличие/отсутствие когнитивного обесцвечивания осветителя. Окружение принято средним в отношении отражающих отпечатков; тусклым в отношении CRT-мониторов или телевизоров; темным в отношении проекционного показа слайдов (при том условии, что он проводится на стандартном оборудовании). В то же время, окружение непосредственно не связано с носителем: разумеется, отпечатки можно рассматривать и в темном окружении или проектировать слайды в окружении среднем.

Предполагается также, что когнитивное обесцвечивание осветителя возникает в отношении объектных цветовых стимулов (отпечатки) и не возникает в отношении излучающих поверхностей (CRT-дисплеи и т.п.). В некоторых си-

туациях может возникнуть эффект неполного когнитивного обесцвечивания осветителя, например, при проекционном показе слайдов.

13.3 МОДЕЛЬ АДАПТАЦИИ

Нижеследующие уравнения описывают расчет хроматической адаптации, интегрированный в RLAB и основанный на модели неполной хроматической адаптации (Фершильд, 1991, 1994 и 1996 гг.). Напомним, что данный расчет уже обсуждался нами в 9-й главе.

Модель начинается с пересчета исходных CIE-трехстимульных значений ($Y = 100$ по белому) в фундаментальные трехстимульные значения (уравнения 13.1 и 13.2). Трехстимульные значения должны быть рассчитаны с использованием Стандартного (CIE, 1931) двухградусного колориметрического наблюдателя. Преобразование должно быть выполнено также и в отношении трехстимульных значений адаптирующего стимула.

$$\begin{vmatrix} L \\ M \\ S \end{vmatrix} = \mathbf{M} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \tag{13.1}$$

$$\mathbf{M} = \begin{vmatrix} 0.3897 & 0.6890 & -0.0787 \\ -0.2298 & 1.1834 & 0.0464 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0000 \end{vmatrix} \tag{13.2}$$

Расчет колбочковых ответов аналогичен хантовской модели: **M**-матрица нормирована так, что трехстимульные значения равноэнергетического осветителя ($X = Y = Z = 100$) дают равновеликие колбочковые ответы ($L = M = S = 100$).

Следующий шаг — вычисление A-матрицы, используемой для моделирования собственно смены хроматической адаптации (уравнение 13.3):

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} a_{\mathrm{L}} & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & a_{\mathrm{M}} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & a_{\mathrm{S}} \end{vmatrix} \tag{13.3}$$

A-матрица представляет собой фонкризовские коэффициенты адаптации, примененные к колбочковым ответам по исследуемому стимулу (LMS) и рассчитываемые по формулам 13.4–13.6:

$$a_L = \frac{p_L + D(1.0 - p_L)}{L_{\mathrm{n}}} \tag{13.4}$$

$$a_M = \frac{p_M + D(1.0 - p_M)}{M_{\mathrm{n}}} \tag{13.5}$$

$$a_S = \frac{p_S + D(1.0 - p_S)}{S_\text{n}} \tag{13.6}$$

где переменные p — пропорции полной фонкризовской адаптации (адаптация иногда бывает полной), они эквивалентны коэффициентам хроматической адаптации хантовской модели и рассчитываются по уравнениям 13.7–13.12, из которых видно, что адаптация будет полнее, если уровень фотометрической яркости растет, или менее полной — если цвет адаптирующего стимула удаляется от цвета равноэнергетического осветителя.

Коэффициент «D» в уравнениях 13.4–13.6 позволяет варьировать степенью когнитивного обесцвечивания осветителя: он должен быть равен 1.0 для твердых копий, 0 — для дисплеев и иметь некое промежуточное значение для проекционного показа слайдов в полностью затемненном помещении. Точное значение D-коэффициента можно использовать для учета уровней хроматической адаптации в различных просмотровых ситуациях, то есть выбор точного значения определяется конкретной просмотровой обстановкой. Пример промежуточной адаптации дают Като (1994) — прямое сравнение твердой копии с изображением на экране монитора, а также Фершильд (1992), описавший случай неполного когнитивного обесцвечивания осветителя в аналогичной ситуации. Если визуальные данные недоступны, но при этом требуются промежуточные значения, выбирается величина 0.5, которая затем корректируется опытным путем.

Отметим, что при полном когнитивном обесцвечивании осветителя ($D = 1.0$) коэффициенты адаптации, описанные уравнениями 13.4–13.6, обратимо редуцируются до колбочковых возбуждений, идентичных простой фонкризовской модели.

$$p_L = \frac{(1.0 + Y_\text{n}^{1/3} + l_E)}{(1.0 + Y_\text{n}^{1/3} + 1.0 / l_E)} \tag{13.7}$$

$$p_M = \frac{(1.0 + Y_\text{n}^{1/3} + m_E)}{(1.0 + Y_\text{n}^{1/3} + 1.0 / m_E)} \tag{13.8}$$

$$p_S = \frac{(1.0 + Y_\text{n}^{1/3} + s_E)}{(1.0 + Y_\text{n}^{1/3} + 1.0 / s_E)} \tag{13.9}$$

$$l_E = \frac{3.0 L_\text{n}}{L_\text{n} + M_\text{n} + S_\text{n}} \tag{13.10}$$

$$m_E = \frac{3.0 M_\text{n}}{L_\text{n} + M_\text{n} + S_\text{n}} \tag{13.11}$$

$$s_E = \frac{3.0 S_\text{n}}{L_\text{n} + M_\text{n} + S_\text{n}} \tag{13.12}$$

где:

— Y_n — абсолютная адаптирующая яркость в cd/m²;

— колбочковые ответы с подстрочным индексом «n» (L_n, M_n, S_n) относятся к адаптирующему стимулу и получены из относительных трехстимульных значений.

После вычисления **A**-матрицы трехстимульные значения исследуемого стимула конвертируются в согласованные трехстимульные значения при эталонных условиях просмотра (уравнения 13.13 и 13.14):

$$\begin{vmatrix} X_{\mathrm{ref}} \\ Y_{\mathrm{ref}} \\ Z_{\mathrm{ref}} \end{vmatrix} = \mathbf{RAM} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \quad (13.13)$$

$$\mathbf{R} = \begin{vmatrix} 1.9569 & -1.1882 & 0.2313 \\ 0.3612 & 0.6388 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0000 \end{vmatrix} \quad (13.14)$$

R-матрица представляет собой инверсию **M**- и **A**-матриц при эталонных условиях просмотра ($\mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}^{-1}$) плюс некую нормировку (см. ниже), которая всегда постоянна и, следовательно, может быть выполнена заранее. Таким образом, уравнение 13.13 — это модифицированный фонкризовский расчет смены хроматической адаптации, конвертирующий трехстимульные значения исследуемого стимула в согласованные трехстимульные значения при условиях просмотра, эталонных для RLAB (осветитель D65, 318 cd/m², полное когнитивное обесцвечивание осветителя).

Следующий шаг — это расчет коррелятов восприятия для модифицированного CIELAB, производимый на основе эталонных трехстимульных значений.

13.4 ОППОНЕНТНЫЕ ЦВЕТОВЫЕ РАЗМЕРНОСТИ

Оппонентные ответы вычисляются в RLAB по уравнениям 13.15–13.17:

$$L^R = 100(Y_{\mathrm{ref}})^\sigma \quad (13.15)$$

$$a^R = 430[(X_{\mathrm{ref}})^\sigma - (Y_{\mathrm{ref}})^\sigma] \quad (13.16)$$

$$b^R = 170[(Y_{\mathrm{ref}})^\sigma - (Z_{\mathrm{ref}})^\sigma] \quad (13.17)$$

где:

— L^R — ахроматический ответ, аналогичный CIELAB L^*;

— a^R — красно-зеленый хроматический ответ (аналогичен CIELAB a^*);

— b^R — желто-синий хроматический ответ (аналогичен CIELAB b^*).

Вспомним, что при эталонных условиях просмотра RLAB-координаты

очень близки к CIELAB-координатам, но все-таки не равны им: уравнения 13.15–13.17 были сознательно упрощены (по сравнению с уравнениями CIELAB) в целях повышения их вычислительной эффективности. Условно-нелинейные функции CIELAB («условно», поскольку при низких значениях XYZ они линейны) были заменены простыми степенными функциями, в результате чего степени этих функций и шкалирующие коэффициенты оказались слегка отличными от таковых в уравнениях CIELAB (Фершильд, 1996).

Стоит отметить также, что в уравнениях 13.15–13.17 (в отличие от формул CIELAB) отсутствует деление на трехстимульные значения белой точки: так сделано потому, что нормировки в RLAB-модели константны и интегрированы в R-матрицу (уравнение 13.4).

Степени функций в уравнениях 13.15–13.17 весьма зависимы от относительной яркости окружения: для среднего окружения $\sigma = 1/2.3$, для темного $\sigma = 1/3.5$. Пропорции этих степеней четко соответствуют изменениям контраста, необходимым при воспроизведении изображений, о чем в свое время говорили Бартлесон (1985) и Хант (1995). По номинальному определению темное окружение обладает практически нулевой яркостью; тусклому окружению приписывается коэффициент отражения меньший, чем 20% от коэффициента отражения белой точки изображения; средним считается окружение, коэффициент отражения которого больше или равен 20% от белой точки изображения.

Точное направление и величина изменений контраста изображения, требуемые для различных условий просмотра, по-прежнему остаются предметом научных исследований и дебатов, поэтому подход к выбору этих параметров должен быть достаточно гибким: в некоторых случаях желательно использовать промежуточные значения степеней, дабы смоделировать менее строгие изменения в относительной яркости окружения. Напомним, что в RLAB-уравнениях вариабельна лишь степень, поскольку эти уравнения не включают в себя условно-нелинейных функций, подобных функциям CIELAB: RLAB-уравнения были написаны как простые степенные функции, для того чтобы можно было применять различные величины степеней (которые могут оказаться более подходящими к специфическим просмотровым условиям, нежели номинальные значения). Плюс к тому, подчас желательно, чтобы степень по светлотной размерности (L^R) отличалась от степени хроматических размерностей (a^R и b^R), но с тем же успехом все три могут быть и одинаковыми.

На рис. 13.2 показан эффект изменения степеней: изображение «a» — типичная печатная репродукция; изображения «b» и «c» демонстрируют такое изменение контраста, какое необходимо для достижения идентичного восприятия оригинала в темном окружении: в «b»-изображении изменен лишь светлотный контраст, тогда как в изображении «c» к хроматическим размерностям применена та же компенсация окружения, что и к светлоте. Изображение «c» имитирует репродукцию, выполненную условной фотографической системой при синхронном увеличении контраста всех трех светочувствительных слоев (что в целом предпочтительно). Отметим, однако, что свойства реальных пленок можно использовать для компенсации некоторого роста чистоты цвета по мере роста контраста. Отметим, что изображения рисунка 13.2 должны ис-







Рис. 13.2 Изображения, иллюстрирующие усиление контраста, необходимое для учета изменений в восприятии при переходе от среднего окружения к темному: (a) — оригинальный отпечаток; (b) — изображение с усиленным светлотным контрастом, предназначенное для рассматривания в темном окружении; (c) — изображение, с усиленными светлотным и хроматическим контрастами, предназначенное для рассматривания в темном окружении.

пользоваться только для иллюстрации вышесказанного, поскольку рассматриваются они не в соответствующих условиях.

13.5 СВЕТЛОТА

Коррелятом светлоты в модели RLAB является L^R, и дальнейших вычислений не требуется.

13.6 ЦВЕТОВОЙ ТОН

Угол цветового тона (h^R) в цветовом пространстве RLAB вычисляется по той же схеме, что и в CIELAB, то есть он выражен в углах от 0° до 360° (0° лежит на положительной a^R-оси, уравнение 13.18):

$$h^R = \tan^{-1}(b^R / a^R) \qquad (13.18)$$

Состав цветового тона (H^R) можно высчитать аналогично тому, как это делается в моделях Ханта и Наятани. H^R полезна при нечисловой оценке модели восприятия, а также тогда, когда нужно воспроизвести именной цветовой тон. Состав цветового тона вычисляется путем линейной интерполяции на основе значений, записанных в таблице 13.1 (получены с помощью NCS — Шведской системы естественных цветов).

Рис. 13.3. демонстрирует локусы однозначных цветовых тонов NCS, которые, отметим, не согласуются с осями цветового пространства и аналогичны

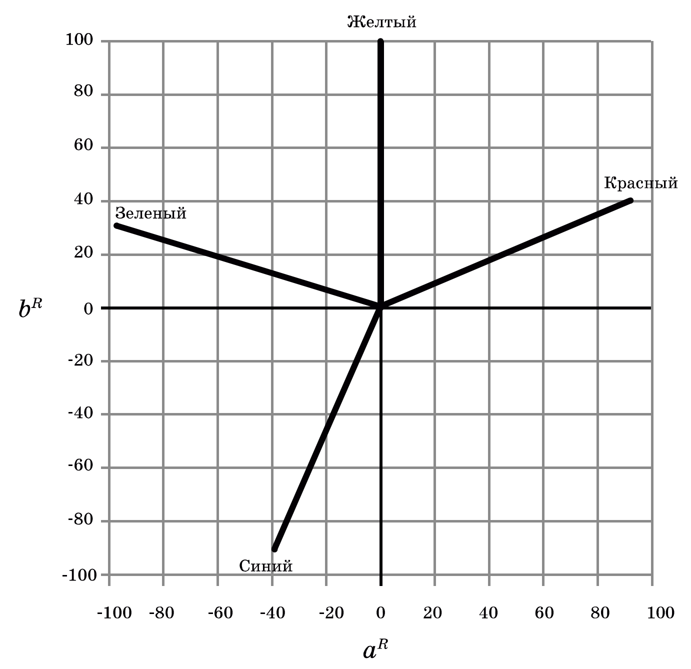


Рис. 13.3 Углы перцепционно-однозначных цветовых тонов в цветовом пространстве RLAB.

CIELAB при эталонных условиях просмотра. Примеры состава цветового тона обозначены курсивом в табл. 13.1.

Таблица 13.1 Данные, необходимые для конверсии угла цветового тона в состав цветового тона

h^R	R	B	G	Y	H^R
24	100	0	0	0	R
90	0	0	0	100	Y
162	0	0	100	0	G
180	*0*	*21.4*	*78.6*	*0*	*B79G*
246	0	100	0	0	B
270	*17.4*	*82.6*	*0*	*0*	*R83B*
0	*82.6*	*17.4*	*0*	*0*	*R17B*
24	100	0	0	0	R

13.7 НАСЫЩЕННОСТЬ

Насыщенность в RLAB вычисляется так же, как и в CIELAB (уравнение 13.19):

$$C^R = \sqrt{(a^R)^2 + (b^R)^2} \quad (13.19)$$

13.8 ЧИСТОТА ЦВЕТА

В некоторых областях деятельности, например в практике работы с изображениями, необходим гамут-мэппинг, причем желательно, чтобы компрессия цветов шла по линиям постоянной чистоты, а не по линиям насыщенности. Монтаг и Фершильд (1996, 1997) описали подобные ситуации, а Вольский, Аллебах и Боумен (1994) предложили соответствующую методику мэппинга.

Напомним, что *чистота цвета* (*saturation*) определена как отношение его *полноты* (*colorfulness*) к его *субъективной яркости* (*brightness*); *насыщенность* (*chroma*) — как отношение полноты цвета к субъективной яркости белого; и наконец, *светлота* (*lightness*) — как отношение субъективной яркости к субъективной яркости белого. Следовательно, чистота цвета может быть определена как отношение насыщенности к светлоте.

Поскольку насыщенность (C^R) и светлота (L^R) уже определены в RLAB, чистота цвета (s^R) определяется уравнением 13.20:

$$s^R = C^R / L^R \tag{13.20}$$

Любопытно, что движение вдоль линии постоянной чистоты цвета будет захватывать серию цветов, которые мы наблюдаем, когда некий объект все глубже и глубже погружается в тень (по этой же причине программы гамут-мэппинга иногда пользуются линиями постоянной чистоты, а не насыщенности).

13.9 ОБРАТНАЯ МОДЕЛЬ

Коль скоро RLAB-модель разработана для использования ее в работе с изображениями, вычислительная эффективность и простота инверсии имеют первостепенное значение (мы видим, что RLAB-модель очень проста в инверсии и что ей необходим минимум вычислений).

Ниже дана пошаговая схема работы RLAB:

1. Получение колориметрических данных исследуемого и адаптирующего стимулов, абсолютной фотометрической яркости адаптирующего стимула, выбор коэффициентов когнитивного обесцвечивания осветителя и значений «σ» (последний основывается на относительной фотометрической яркости окружения).
2. Вычисление матрицы хроматической адаптации (**A**-матрица).
3. Вычисление эталонных трехстимульных значений.
4. Вычисление RLAB-параметров L^R, a^R и b^R.
5. Вычисление C^R и h^R на основе a^R и b^R.
6. Определение H^R на основе h^R.
7. Вычисление s^R на основе C^R и L^R.

В типичных цветорепродукционных ситуациях недостаточно *знать* величины атрибутов цветового восприятия элементов изображения — необходимо еще *сохранить* это восприятие в иных условиях просмотра (см. рис. 13.4). Для того чтобы добиться желаемого эффекта, нужно иметь возможность вычислить

CIE-трехстимульные значения (XYZ) из $L^Ra^Rb^R$-параметров с учетом новых условий просмотра. Новые трехстимульные значения в дальнейшем используются для характеризации цветовоспроизводящих устройств, при помощи которой определяют, какими должны быть их аппаратные данные (device color signals), скажем, RGB или CMYK. Нижеследующие уравнения показывают, каким образом можно вычислить CIE-трехстимульные значения из RLAB $L^Ra^Rb^R$. (Если начинать со значений $L^RC^Rh^R$, то вначале нужно пересчитать их в $L^Ra^Rb^R$ по схеме преобразования цилиндрических координат в прямоугольные.)

Эталонные трехстимульные значения, вычисленные из RLAB-параметров по уравнениям 13.21–13.23, будут соответствовать *вторым* условиям просмотра:

$$Y_{\text{ref}} = \left(\frac{L^R}{100}\right)^{1/\sigma} \qquad (13.21)$$

$$X_{\text{ref}} = \left[\left(\frac{a^R}{430}\right) + (Y_{\text{ref}})^{\sigma}\right]^{1/\sigma} \qquad (13.22)$$

$$Z_{\text{ref}} = \left[(Y_{\text{ref}})^{\sigma} - \left(\frac{b^R}{170}\right)\right]^{1/\sigma} \qquad (13.23)$$

Эталонные трехстимульные значения преобразовываются затем в трехстимульные значения для вторых условий просмотра по уравнению 13.24, в котором **A**-матрица также вычислена для вторых условий:

$$\begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} = (\mathbf{RAM})^{-1} \begin{vmatrix} X_{\text{ref}} \\ Y_{\text{ref}} \\ Z_{\text{ref}} \end{vmatrix} \qquad (13.24)$$

13.10 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФЕНОМЕНОВ

RLAB-модель выдает корреляты только относительных атрибутов цветового восприятия (светлоту, насыщенность, чистоту цвета и цветовой тон). Модель нельзя использовать для прогнозирования субъективной яркости и полноты цвета (однако это ограничение малозначимо в практике работы с изображениями, поскольку такие данные требуются крайне редко).

RLAB содержит расчет смены хроматической адаптации с учетом когнитивного обесцвечивания осветителя и прогнозирует неполноту хроматической адаптации по некоторым стимулам (к примеру, RLAB корректно предсказывает, что CRT-дисплей с белой точкой D50 будет восприниматься желтоватым).

Модель также включает в себя различные «σ», регулирующие контраст-

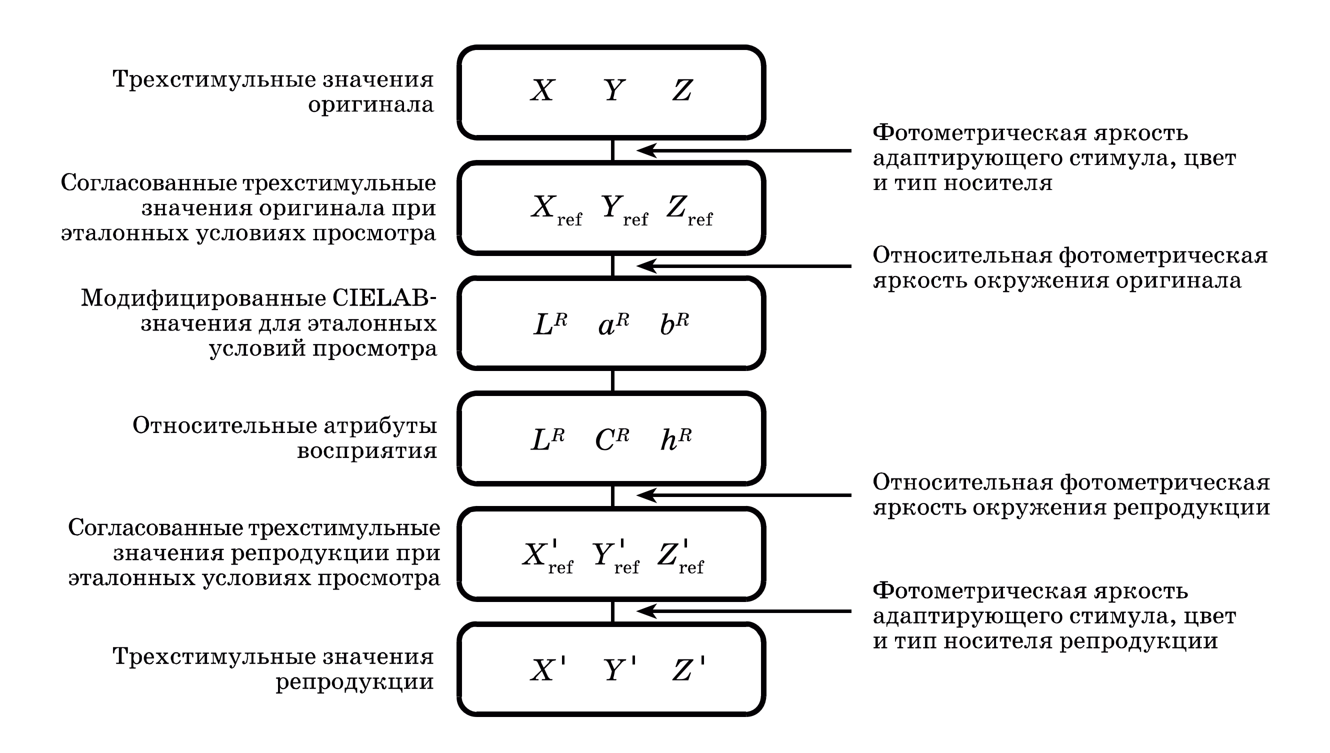


Рис. 13.4 Поточная диаграмма применения RLAB-модели к процессу репродуцирования изображений.

ность изображения как функцию от относительной яркости окружения (что критично при воспроизведении изображений на различных носителях).

Если же возникает необходимость предсказать абсолютные атрибуты восприятия (то есть субъективную яркость и полноту цвета) или же еще более редкие феномены, то обращаться нужно к расширенным моделям цветового восприятия, таким, как модель Наятани и модель Ханта.

Примеры вычислений с использованием модели цветового восприятия RLAB даны в таблице 13.2.

13.11 ПОЧЕМУ НЕ ТОЛЬКО RLAB?

RLAB-модель проста, однозначна, легко инвертируема и в практическом плане ничуть не менее (если не более) точна, чем полные модели цветового восприятия. Так почему же несмотря на все перечисленные достоинства RLAB-модель не была рекомендована как единая, универсальная модель?

Слабых сторон у RLAB не меньше, чем сильных, и поскольку RLAB — это простая модель, ее возможности весьма ограничены:

— модель не включает в себя коррелятов субъективной яркости и полноты цвета;

— модель не может использоваться в большом диапазоне уровней яркости;

— модель не прогнозирует некоторые феномены восприятия, такие, как эф-

Таблица 13.2 Примеры вычислений по RLAB-модели

Величина	Пример 1	Пример 2	Пример 3	Пример 4
X	19.01	57.06	3.53	19.0
Y	20.00	43.06	6.56	20.00
Z	21.78	31.96	2.14	21.78
X_n	95.05	95.05	109.85	109.85
Y_n	100.00	100.00	100.00	100.00
Z_n	108.88	108.88	35.58	35.58
Y_n (cd/m^2)	318.31	31.83	318.31	31.83
σ	0.43	0.43	0.43	0.43
D	1.0	1.0	1.0	1.0
L^R	49.67	69.33	30.78	49.83
a^R	0.00	46.33	−40.96	15.57
b^R	−0.01	18.09	2.25	−52.61
h^R	270.0	21.3	176.9	286.5
H^R	R83B	R2B	B74G	R71B
C^R	0.01	49.74	41.02	54.87
s^R	0.00	0.72	1.33	1.10

фект Ханта, эффект Стивенса (впрочем, его можно имитировать, внося изменения в «σ» по адаптирующему стимулу, а не по относительной яркости окружения), эффект Хельсона — Джадда.

В практике работы с изображениями перечисленные недостатки RLAB-модели не имеют особого значения из-за ограниченности цветовых охватов воспроизводящих устройств (однако в иных сферах эффекты Ханта, Стивенса и Хельсона — Джадда могут быть важны, и для их прогнозирования потребуется другая модель цветового восприятия.

Короче говоря, RLAB-модель весьма хороша для работы с изображениями (собственно, ради этого она и была создана), но недостаточно полна и развита, чтобы действовать во всех возможных ситуациях, где критична оценка цветового восприятия.

14 ПРОЧИЕ МОДЕЛИ

В предыдущих главах мы дали обзор четырех наиболее распространенных, универсальных моделей цветового восприятия, описывающий процесс их эволюции в направлении CIECAM (см. гл. 15 и 16). В текущей главе мы кратко опишем еще две модели — ATD и LLAB. Первая была создана довольно давно, вторая — совсем недавно. По ряду причин, о которых речь пойдет ниже, обе модели (как и те, что уже обсуждались) не были приняты в качестве стандартных, однако отдельные элементы их структуры интересны как с исторических позиций, так и в плане понимания путей развития будущих моделей. С ATD- и LLAB-моделями мы познакомимся для того, чтобы понять характер и степень их влияния на дело моделирования цветового восприятия.

14.1 КРАТКИЙ ОБЗОР

Модели цветового восприятия были и остаются предметом активного научного исследования, и наша книга — это всего лишь краткий обзор проблем, возникающих сегодня на этом пути, а также некоторых подходов к их решению. Сегодня невозможно создать некую единую модель цветового восприятия, которая будет содержать в себе готовые рецепты решения всех возможных задач: такая модель — это наш «Святой Грааль», и поэтому мы не надеемся на скорый результат.

В главах 10–13 в хронологическом порядке были рассмотрены лучшие подходы к решению проблем спецификации цветового восприятия и задач цветовоспроизведения. До недавнего времени (как раз в тот период, когда вышло первое издание данной книги) существовала некая модель, развитием которой занимался Технический комитет CIE 1-34 (предпринимались попытки повсеместного внедрения в промышленную практику спецификации цветового восприятия). Состояние модели на тот период было описано в приложении к первому изданию «Моделей цветового восприятия», но несколько лет спустя результат работы, получивший название «CIECAM97s», был опубликован, и модель стала активно применяться, а спустя еще некоторое время CIECAM97s была пересмотрена. Результаты дальнейшего совершенствования CIECAM97s (CIE TC8-01) были оформлены CIE как модель CIECAM02. Эти две самых последних версии моделей цветового восприятия, созданных под эгидой CIE — CIECAM97s и CIECAM02 — описаны в главах 15 и 16. Одна из них наверняка окажется подходящей в той или иной производственной ситуации, однако еще раз повторим: отдельно взятая модель не может явиться оптимальным решением всех возможных задач. Поскольку процесс развития моделей цветового восприятия идет путем проб и ошибок, мы должны описать и те модели, что оказали (или оказывают) определенное влияние на нашу область исследования.

В текущей главе мы опишем две модели:

1. ATD-модель, созданную Гутом (1995), история развития которой длилась более 30 лет (Гут, 1994).

2. LLAB-модель, сравнительно недавно разработанную научной группой Луо (1996).

14.2 МОДЕЛЬ ATD

ATD-модель, разработанная Гутом, — это модель самостоятельного типа, описанного в предыдущих главах нашей книги. Фактически, согласно определению CIE TC1-34, ATD нельзя рассматривать как собственно модель цветового восприятия, поскольку она была разработана с целями, не подпадающими под CIE-определение. Модель Гута — это скорее модель цветового зрения, более всего соответствующая его начальным стадиям.

Гут (1994) дал прекрасный обзор происхождения и исполнения своей модели, история которой уходит в 1972 г. Модель ATD была разработана для прогнозирования научных величин таких феноменов, как хроматическая дифференцировка, абсолютные пороги, гетерохроматическое соответствие по субъективной яркости, световая и хроматическая адаптации. ATD способна к удивительно точному предсказанию перечисленных феноменов, однако большая часть экспериментов была выполнена с изолированными цветовыми стимулами, для которых модель и строилась (и лишь случайная модификация смогла отчасти приспособить ATD к работе с неизолированными цветовыми стимулами). Сказанное объясняет то, почему модель оперирует лишь величинами хроматической дифференцировки, субъективной яркости, чистоты цвета и цветового тона, но при этом не может выдать предикторов по другим, не менее важным атрибутам восприятия: светлоте, полноте цвета и насыщенности. Данное ограничение сужает сферу применения ATD-модели, но ее общая структура (а также расчет смены хроматической адаптации, интегрированный в нее) вполне заслуживают внимания и изучения.

Позже ATD-модель была усовершенствована и в ряде сфер использовалась для работы с изображениями. Области применения ATD-модели описаны Грэнджером (1994, 1995), который (в целях создания пространства, описывающего цветовое восприятие и позволяющего применить модель в издательском деле) очень удачно выполнил кодирование оппонентных размерностей. Однако Грэнджер не включил в свою модификацию какого-либо расчета смены хроматической адаптации, из-за чего сфера применения модели сузилась до единственного варианта белой точки, при котором пользователь вынужден идти на ложное допущение, будто бы стимулы отпечатка цветоконстантны.

Цели и подход

Как уже было сказано, у ATD-модели долгая история развития, ее совершенствование было нацелено на прогнозирование различных цветовых данных. Гут (1995) относит ATD к «моделям цветовых ощущений и визуальной адаптации», и такое определение, безусловно, является очень точным. Относи-

тельно целевого назначения ATD ученый делает весьма претенциозное заявление: «...научному сообществу пора заменить ею все ныне действующие прогностические модели и стандарты, касающиеся человеческого цветового восприятия». Ниже, на примере ATD последнего пересмотра (ATD-95), будет показана несостоятельность такого заявления.

Выше мы дали общую трактовку гутовской идеи, но для глубокого исследования устройства ATD-модели и ее возможностей адресуем любознательного читателя к последним работам Гута (Гут, 1991), а также к недавним источникам, описывающим различные модификации ATD.

Модель начинается с нелинейных колбочковых ответов, следующих за нелинейным фонкризовским контролем рецепторного усиления и с двухстадийного оппонентного ответа, необходимого для прогноза различных феноменов цветоразличения и восприятия. Завершает модель нейронная компрессия оппонентных сигналов. Литеры «A», «T» и «D» — это аббревиатура от ахроматического (Achromatic), тританопического (Tritanopic) и дейтеранопического (Deuteranopic) механизмов: A-система — субъективно-яркостные сигналы, T- и D-системы — это соответственно красно-зеленые и желто-синие оппонентные сигналы.

Входные данные

Входные данные ATD-модели оперируют изолированными цветовыми стимулами с трехстимульным обозначением $X`Y`Z`$ (джаддовская модификация трехстимульных значений, то есть *не* CIE $XYZ$), выраженными в абсолютных единицах фотометрической яркости. $X`Y`Z`$-значения шкалированы так, что $Y`$ равна Y (фотопическая яркость), выраженной в т.н. тролландах. Троланд — это мера освещенности сетчатки, выражаемая через долевые коэффициенты полного диаметра зрачка. Поскольку диаметр зрачка до определенной степени зависит от яркости сцены, Гут предложил конверсию из единиц фотометрической яркости (cd/m^2) в освещенность сетчатки в тролландах, выполняемую путем возведения яркости в степень 0.8 с последующим умножением на 18 (как на оправданную аппроксимацию экспериментальных данных).

В строгом смысле ATD-модель не является CIE-колориметрической, поскольку, как мы уже сказали, она основана на джаддовской модификации трехстимульных значений ($X`Y`Z`$), но не на самих CIE-трехстимульных значениях ($XYZ$). Однако же Гут (1995) утверждает, что «вероятно, в большинстве случаев было бы все-таки правильнее использовать $XYZ$, нежели $X`Y`Z`$...», и мы покажем, что в итоге стали использовать именно *CIE XYZ*.

Для предсказания цветовых ощущений от неизолированных стимулов необходимы абсолютные трехстимульные значения по адаптирующему стимулу, выраженные в тролландах ($X_0Y_0Z_0$). Гут (1995) предложил весьма невнятную методику получения этих значений путем измышления неких трехстимульных значений белого эталона, освещенного источником, подобным исследуемому стимулу.

Никаких других входных данных ATD-модели не требуется, и ясно, что ATD не учитывает влияний фона, окружения и когнитивных факторов.

Модель адаптации

Как и во всех моделях, описанных в нашей книге, первый шаг в работе ATD — это преобразование CIE (или джаддовских) трехстимульных значений в колбочковые ответы. Однако важным отличием ATD-модели от других является то, что в ней колбочковые ответы нелинейны, и то, что на данной стадии к ним добавлены т.н. аддитивные шумовые сигналы. Преобразования даны в уравнениях 14.1–14.3:

$$L = [0.66(0.2435X + 0.8524Y - 0.0516Z)]^{0.70} + 0.024 \quad (14.1)$$

$$M = [1.0(-0.3954X + 1.1642Y + 0.0837Z)]^{0.70} + 0.036 \quad (14.2)$$

$$S = [0.43(0.04Y + 0.6225Z)]^{0.70} + 0.31 \quad (14.3)$$

Затем с помощью модифицированного фонкризовского расчета моделируется хроматическая адаптация (уравнения 14.4–14.6):

$$L_g = L[\sigma / (\sigma + L_a)] \quad (14.4)$$

$$M_g = M[\sigma / (\sigma + M_a)] \quad (14.5)$$

$$S_g = S[\sigma / (\sigma + S_a)] \quad (14.6)$$

где:

— L_g, M_g и S_g — постадаптационные колбочковые сигналы;

— σ — переменная, влияющая на данные разных категорий (номинальное значение σ равно 300).

Колбочковые сигналы по адаптирующему стимулу ($L_aM_aS_a$) определены как взвешенная сумма трехстимульных значений исследуемого стимула и трехстимульных значений белого эталона (или другого адаптирующего стимула) (уравнения 14.7–14.9), преобразованная затем в колбочковые сигналы (уравнения 14.1–14.3):

$$X_a = k_1X + k_2X_0 \quad (14.7)$$

$$Y_a = k_1Y + k_2Y_0 \quad (14.8)$$

$$Z_a = k_1Z + k_2Z_0 \quad (14.9)$$

В случае изолированных цветовых стимулов предполагается самоадаптация, и k_1 устанавливается на 1.0, при этом k_2, разумеется, на 0. В случае неизо-

лированных цветовых стимулов (наиболее распространенная ситуация для колориметрических приложений) k_1 устанавливается на 0, а k_2 — на значение, лежащее в диапазоне от 15 до 50 (Гут, 1995). В некоторых случаях наблюдатель может адаптироваться как по исследуемому стимулу, так и, частично, по белой точке. В этих случаях должна использоваться иная комбинация коэффициентов ($k_1 = 1.0$ и $k_2 = 5.0$).

Гут не дал однозначных рекомендаций в отношении того, как вычислять колбочковые сигналы по адаптирующему свету, однако же стоит отметить, что по мере повышения k_2 (или по мере понижения s) расчет смены адаптации (уравнения 14.4–14.6) становится все более похожим на номинальный фонкризовский расчет. Таким образом, не составляет особого труда заставить ATD-модель выполнять расчет смены адаптации по фонкризовской схеме (рекомендуется, чтобы максимальное значение гутовского коэффициента k_2 было равно 50, а коэффициент k_1 был установлен на 0.0).

Оппонентные цветовые размерности

Следующий этап в работе ATD-модели — это преобразование адаптированных колбочковых сигналов в двухстадийные исходные (initial) оппонентные сигналы. Сигналы первой стадии, обозначаемые как A_{1i}, T_{1i} и D_{1i}, вычисляются по уравнениям 14.10–14.12. Сигналы второй стадии, обозначаемые соответственно как A_{2i}, T_{2i} и D_{2i}, вычисляются по уравнениям 14.13–14.15:

$$A_{1i} = 3.57L_g + 2.64M_g \quad (14.10)$$

$$T_{1i} = 7.18L_g - 6.21M_g \quad (14.11)$$

$$D_{1i} = -0.70L_g + 0.085M_g + 1.00S_g \quad (14.12)$$

$$A_{2i} = 0.09A_{1i} \quad (14.13)$$

$$T_{2i} = 0.43T_{1i} + 0.76D_{1i} \quad (14.14)$$

$$D_{2i} = D_{1i} \quad (14.15)$$

Финальные ATD-ответы вычисляются по исходным сигналам первой и второй стадий (уравнения 14.16–14.21):

$$A_1 = A_{1i} / (200 + |A_{1i}|) \quad (14.16)$$

$$T_1 = T_{1i} / (200 + |T_{1i}|) \quad (14.17)$$

$$D_1 = D_{1i} / (200 + |D_{1i}|) \quad (14.18)$$

$$A_2 = A_{2i} / (200 + |A_{2i}|) \tag{14.19}$$

$$T_2 = T_{2i} / (200 + |T_{2i}|) \tag{14.20}$$

$$D_2 = D_{2i} / (200 + |D_{2i}|) \tag{14.21}$$

Оппонентные сигналы первой стадии используются для моделирования субъективной яркости и порогов (абсолютных порогов и порогов различения). Пороги моделируются как эвклидово расстояние в трехмерном цветовом пространстве $A_1T_1D_1$ с величиной визуального порога примерно равной 0.005 единиц. Оппонентные сигналы второй стадии используются для моделирования больших цветовых отличий, а также цветового тона и чистоты цвета.

Корреляты восприятия

ATD-модель прогнозирует субъективную яркость, чистоту цвета и цветовой тон.

Коррелят субъективной яркости (B_r) вычисляется как корень квадратный из суммы квадратов A_1-, T_1- и D_1-ответов (уравнение 14.22):

$$B_r = \sqrt{(A_1^2 + T_1^2 + D_1^2)} \tag{14.22}$$

Чистота цвета (C) вычисляется как отношение корня квадратного из суммы квадратов хроматических ответов второй стадии (T_2 и D_2) к ахроматическому ответу A_2 (уравнение 14.23):

$$C = \sqrt{(T_2^2 + D_2^2)} / A_2 \tag{14.23}$$

Гут (1995), как мы видим, путает понятия «чистота цвета» и «насыщенность», однако ясно, что формула 14.23 — это все-таки уравнение чистоты цвета, а не насыщенности, поскольку измерение ведется относительно ахроматического ответа по исследуемому стимулу, а не относительно сходным образом освещенного белого эталона.

Гут указывает на то, что цветовой тон непосредственно связан с величиной H (уравнение 14.24). Однако отношение в уравнении 14.24 сомнительно (равные величины для разных цветовых тонов, бесконечные для ряда других, неопределенные для третьих...), поэтому добавим, что обычно берется арктангенс этого отношения:

$$H = T_2 / D_2 \tag{14.24}$$

ATD-модель не дает коррелятов светлоты, полноты цвета, насыщенности и состава цветового тона.

Предсказание феноменов

Модель ATD учитывает хроматическую адаптацию, гетерохроматическое соответствие по субъективной яркости (эффект Гельмгольца — Кольрауша), цветовой сдвиг Бецольда — Брюкке, эффект Эбнея, а также различные эффекты цветоразличения. Модель включает в себя корреляты субъективной яркости и чистоты цвета, а коррелят цветового тона легко вычислить (даже несмотря на то, что состав цветового тона моделью не рассчитывается).

ATD неадекватна неизолированным стимулам, поскольку не выдает коррелятов светлоты и насыщенности. Модель не видит разницы между соответствием по субъективной яркости/полноте цвета и соответствием по светлоте/насыщенности. Неясно также, по какому типу соответствия рассчитывается смена хроматической адаптации, но вероятнее всего, по субъективной яркости/полноте цвета, поскольку задействованы абсолютные единицы. ATD-модель нельзя использовать без предварительной модификации для прогнозирования эффектов фона и окружения или эффектов, основанных на смене носителя изображений (таких, как когнитивное обесцвечивание осветителя).

Примеры вычислений по ATD-модели даны в таблице 14.1.

Таблица 14.1 Примеры вычислений по ATD-модели

Величина	Пример 1	Пример 2	Пример 3	Пример 4
X	19.01	57.06	3.53	19.01
Y	20.00	43.06	6.56	20.00
Z	21.78	31.96	2.14	21.78
X_0	95.05	95.05	109.85	109.85
Y_0	100.00	100.00	100.00	100.00
Z_0	108.88	108.88	35.58	35.58
Y_0 (cd/m^2)	318.31	31.83	318.31	31.83
σ	300	300	300	300
k_1	0.0	0.0	0.0	0.0
k_2	50.0	50.0	50.0	50.0
A_1	0.1788	0.2031	0.1068	0.1460
T_1	0.0287	0.0680	−0.0110	0.0007
D_1	0.0108	0.0005	0.0044	0.0130
A_2	0.0192	0.0224	0.0106	0.0152
T_2	0.0205	0.0308	−0.0014	0.0102
D_2	0.0108	0.0005	0.0044	0.0130
B_r	0.1814	0.2142	0.1075	0.1466
C	1.206	1.371	0.436	1.09
H	1.91	63.96	−0.31	0.79

Почему не только ATD-модель?

ATD-модель дает простую, весьма элегантную схему начальных этапов обработки сигналов в зрительной системе человека. Ясно также, что модель позволяет прогнозировать весьма разнообразные явления, но при этом она трудноприменима на практике: дабы ATD-модель могла эффективно работать, ряд ее аспектов требует дальнейшего определения и специфицирования. Таким образом, гибкость ATD, благодаря которой можно прогнозировать разнообразные феномены, оборачивается трудностями в ее практическом употреблении: ATD-модель можно применить на практике только при условии определенной доработки, которая, в частности, была выполнена Грэнджером (1994, 1995). Однако даже грэнджеровская модификация не позволила назвать ATD полноценной моделью цветового восприятия, поскольку игнорирует хроматическую адаптацию.

Достоинство ATD состоит в том, что модель легко обратима (при k_1=0).

Недостатки модели — это отсутствие четкой структуры, неадекватная обработка неизолированных цветовых стимулов (необходимая в большинстве случаев) и неучет когнитивных факторов. Плюс к тому, ATD не имеет прямой связи с CIE-трехстимульными значениями.

Отметим, что ATD нельзя рассматривать как модель цветового восприятия в первую очередь потому, что она не выдает предикторов светлоты и насыщенности (однако как схема зрительной обработки сигналов и их разделения ATD заслуживает определенного внимания).

14.3 МОДЕЛЬ LLAB

Сравнительно недавно в семействе моделей цветового восприятия появилась модель LLAB. По структуре LLAB подобна RLAB-модели (описана в гл. 13), однако в отличие от нее не включает в себя ряд эффектов. Модель была разработана Луо, Ло и Куо (1996), но еще до своей первой публикации пересмотрена Луо и Моровиком. В текущей главе разговор пойдет о модели обновленной, но также коснется и ее оригинальной формулировки.

В противоположность зрительным моделям, LLAB была создана как модель колориметрическая, расширяющая CIE-колориметрию (LLAB является плодом серии визуальных экспериментов по изучению цветового восприятия и шкалированию цветовых отличий).

Модель призвана быть универсальной моделью цветового сравнения, спецификации цветового восприятия и измерения цветовых отличий. Подобно RLAB, модель LLAB относительно примитивна и не может прогнозировать все известные визуальные феномены. В то же время она не настолько проста, как RLAB, и может прогнозировать ряд эффектов, не учитываемых RLAB-моделью.

Цели и подход

Как уже было сказано выше, LLAB-модель, описанная Луо и колл. в 1996 г., создана на базе большого числа данных, полученных Луо и его сотрудниками

благодаря серийным экспериментам по изучению цветового восприятия и цветоразличения. Итогом экспериментов явилось испытание различных моделей цветового восприятия и появление формул цветовых отличий (Луо и колл., 1996), а собственно LLAB — это попытка свести результаты данной работы в цельную, логически выстроенную модель.

Концепция LLAB подобна концепции RLAB-модели, но существенно отличается от нее в деталях. Модель начинается с расчета смены хроматической адаптации по схеме, известной как BFD-преобразование трехстимульных значений от исследуемых условий просмотра к определенным эталонным условиям (разработано в брэдфордском университете, но до появления LLAB не опубликовано).

На следующем этапе вычисляются модифицированные CIELAB-координаты для эталонных условий и рассчитываются корреляты восприятия. Учет относительной яркости окружения реализован за счет варьирования степенями неких функций, то есть аналогично RLAB. Управление шкалой полноты цвета основано на нелинейной функции насыщенности, включенной в CMC-формулу цветовых отличий (Кларк и колл., 1984). Также модель LLAB включает в себя коэффициент светлотного контраста, зависящий от относительной яркости фона. Угол цветового тона определяется тем же путем, что и в CIELAB, а состав цветового тона специфицирован по методу, сходному с методами Наятани, Ханта и RLAB. И наконец, взвешивающие коэффициенты светлоты и насыщенности могут быть применены для вычисления цветовых отличий по схеме CMC и CIE94, поэтому полное название модели звучит как LLAB(l:c).

Входные данные

LLAB-модели требуются относительные трехстимульные значения стимула (XYZ), условного белого эталона ($X_0Y_0Z_0$), фотометрическая яркость условного белого эталона в cd/m^2 (L) и коэффициент фотометрической яркости фона (Y_b). Плюс к тому, необходим выбор коэффициентов когнитивной поправки на осветитель (D), индукции окружения (F_S), индукции светлоты (F_L) и индукции насыщенности (F_C). По специфическим условиям просмотра значения перечисленных переменных даны в таблице 14.2.

Таблица 14.2 Величины коэффициентов индукции для LLAB-модели

	D	F_S	F_L	Fc
Отражающие образцы (изображения) в среднем окружении:				
захватывающие $< 4^\circ$	1.0	3.0	0.0	1.00
захватывающие $> 4^\circ$	1.0	3.0	1.0	1.00
Телевидение и VDU-дисплеи в тусклом окружении	0.7	3.5	1.0	1.00
Листовые слайды в тусклом окружении	1.0	5.0	1.0	1.10
Проекционный показ 35 мм слайдов в темном окружении	0.7	4.0	1.0	1.00

Модель адаптации

Для вычисления согласованных цветовых стимулов по эталонным условиям просмотра LLAB-модель задействует брэдфордский расчет смены хроматической адаптации. BFD-преобразование — это модифицированный фонкризовский расчет, при котором «коротковолновые» колбочковые сигналы адаптационно нелинейны, в то время как «средне-» и «длинноволновые» описываются простой фонкризовской схемой.

Первый шаг — это трансформация CIE *XYZ*-значений в нормированные колбочковые ответы, поименованные как *RGB* (уравнения 14.25 и 14.26):

$$\begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix} = \mathbf{M} \begin{vmatrix} X/Y \\ Y/Y \\ Z/Y \end{vmatrix} \qquad (14.25)$$

$$\mathbf{M} = \begin{vmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{vmatrix} \qquad (14.26)$$

Стоит отметить, что преобразование по формулам 14.25 и 14.26 вдвойне необычно:

— во-первых, CIE-трехстимульные значения всегда нормированы на *Y*, причем *до* преобразования (нормировка по яркости), в результате чего все стимулы с идентичными координатами цветности имеют сходные колбочковые сигналы. Такая нормировка требуется для сохранения ахроматических шкал в процессе нелинейного расчета смены хроматической адаптации, описанного ниже;

— во-вторых, преобразование представляет не истинные колбочковые ответы, а принудительно «спектрально заостренные» колбочковые ответы с отрицательной чувствительностью по некоторым длинам волн. Использование таких кривых чувствительности имеет тенденцию к сохранению чистоты цвета несмотря на изменения в адаптации и позволяют прогнозировать изменения в цветовом тоне несмотря на адаптацию. Отметим, что BFD-преобразование на выходе дает *RGB*-сигналы, которые нельзя рассматривать как физиологически истинные колбочковые ответы, но для удобства их все же называют именно «колбочковыми ответами».

Текущие колбочковые ответы преобразуются затем в согласованные колбочковые ответы при адаптации по эталонному осветителю, который определен как CIE D65-осветитель при стандартном колориметрическом наблюдателе CIE 1931 ($X_{0r} = 95.05$, $Y_{0r} = 100.0$, $Z_{0r} = 108.88$). Преобразование выполняется по формулам 14.27–14.30:

$$R_r = [D(R_{0r} / R_0) + 1 - D]R \qquad (14.27)$$

$$G_r = [D(G_{0r} / G_0) + 1 - D]G \tag{14.28}$$

$$B_r = [D(B_{0r} / B_0^{\beta}) + 1 - D]B^{\beta} \tag{14.29}$$

$$\beta = (B_0 / B_{0r})^{0.0834} \tag{14.30}$$

В случаях, когда B-ответы отрицательны, уравнение 14.29 заменяется на уравнение 14.31, дабы корень не имел отрицательных значений:

$$B_r = -[D(B_{0r} / B_0^{\beta}) + 1 - D]|B|^{\beta} \tag{14.31}$$

D-коэффициенты уравнений 14.27–14.31 позволяют учитывать степень когнитивного обесцвечивания осветителя: когда оно возникает, $D = 1.0$ и наблюдатели полностью адаптированы к цвету источника освещения. Если адаптации нет, то $D = 0.0$ и наблюдатели считаются адаптированными по эталонному осветителю. Когда наблюдатели адаптированы по источнику освещения с промежуточной цветностью, D указывает на долю адаптации по фактическому источнику (в этом состоит отличие D-значений модели LLAB от таковых в RLAB, где данная переменная при разных уровнях неполной адаптации зависит от цвета и яркости источника: если $D = 0.0$ в RLAB, это означает не отсутствие адаптации, а неполноту адаптации по фактическому источнику).

Последний шаг в расчете смены хроматической адаптации — это конверсия колбочковых сигналов по эталонным условиям просмотра в CIE-трехстимульные значения $X_rY_rZ_r$ (уравнение 14.32):

$$\begin{vmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{vmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{vmatrix} R_r Y \\ G_r Y \\ B_r Y \end{vmatrix} \tag{14.32}$$

Оппонентные цветовые размерности

При расчете оппонентных размерностей согласованные трехстимульные значения при эталонном осветителе (D65) с использованием модифицированной CIELAB-формулировки преобразуются в предварительные оппонентные размерности (уравнения 14.33–14.36):

$$L_L = 116 f(Y_r / 100)^z - 16 \tag{14.33}$$

$$z = 1 + F_L (Y_b / 100)^{1/2} \tag{14.34}$$

$$A = 500[f(X_r / 95.05) - f(Y_r / 100)] \tag{14.35}$$

$$B = 200[f(Y_r / 100) - f(Z_r / 108.88)] \quad (14.36)$$

где:

— степень «z» используется для учета светлотного контраста с фоном (напомним, что подобная форма использована в модели Ханта);

— нелинейность L_L-, A- и B-размерностей (следуя определению CIELAB-уравнений) зависит от относительных трехстимульных значений (уравнения 14.37 и 14.38).

Для значений $\omega > 0.008856$ используется уравнение 14.37:

$$f(\omega) = (\omega)^{1/F_S} \quad (14.37)$$

Для значений $\omega \leq 0.008856$ — уравнение 14.38:

$$f(\omega) = [(0.008856^{1/F_S} - 16/116)/0.008856]\omega + 16/116 \quad (14.38)$$

Значение F_S зависит от относительной яркости окружения, что показано в таблице 14.2. Данная зависимость подобна зависимости от окружения, учитываемой RLAB-моделью.

Корреляты восприятия

LLAB-модель выдает предикторы светлоты, насыщенности, полноты цвета, чистоты цвета, угла цветового тона и состава цветового тона.

Предиктор светлоты (L_L) определен уравнением 14.33. Предиктор насыщенности (Ch_L) и полноты цвета (C_L) получают с использованием нелинейной функции, которая аналогична взвешивающей функции насыщенности, задействованной в CMC-формулах. Поведение CMC-формул в LLAB-цветовом пространстве описывается уравнениями 14.39–14.43:

$$C = \sqrt{(A^2 + B^2)} \quad (14.39)$$

$$Ch_L = 25\ln(1 + 0.05C) \quad (14.40)$$

$$C_L = Ch_L S_M S_C F_C \quad (14.41)$$

$$S_C = 1.0 + 0.47\log(L) - 0.057[\text{Log}(L)]^2 \quad (14.42)$$

$$S_M = 0.7 + 0.02L_L - 0.0002L_L^2 \quad (14.43)$$

где:

— F_C — это коэффициент индукции насыщенности, определяемый по таблице 14.2;

— S_C — обеспечивает яркостную зависимость, необходимую для предсказания повышения полноты цвета по мере роста фотометрической яркости, благодаря чему C_L является точным предиктором полноты цвета;

— S_M — обеспечивает аналогичную светлотную зависимость.

Чистота цвета (s_L) определена в LLAB как отношение насыщенности к светлоте (уравнение 14.44):

$$s_L = Ch_L / L_L \tag{14.44}$$

Угол цветового тона (h_L) в LLAB вычисляется обычным путем (уравнение 14.45):

$$h_L = \tan^{-1}(B / A) \tag{14.45}$$

Состав цветового тона вычисляется в логике NCS путем линейной интерполяции однозначных цветовых тонов, которые определены как 25° (красный), 93° (желтый), 165° (зеленый) и 254° (синий).

Финальные оппонентные сигналы рассчитываются с использованием шкал полноты цвета (C_L) и угла цветового тона (h_L) по уравнениям 14.46 и 14.47:

$$A_L = C_L \cos(h_L) \tag{14.46}$$

$$B_L = C_L \sin(h_L) \tag{14.47}$$

В изначальной версии (Луо, Ло и Куо, 1996) модель LLAB не давала предикторов субъективной яркости, насыщенности и чистоты цвета. Во второй редакции Луо и Моровика (1996) добавлены предикторы двух последних.

Цветовые отличия

LLAB-модель включает в себя взвешивающую функцию насыщенности, взятую из CMC-формулы. Зависимость от насыщенности — это очень важный фактор, радикально улучшающий работу CMC в сравнении с простой формулой CIELAB ΔE^*_{ab}. Цветовые отличия в LLAB(l:c) рассчитываются по уравнению 14.48:

$$\Delta E_L = [(\Delta L_L / l)^2 + \Delta A_L^2 + \Delta B_L^2] \tag{14.48}$$

где l — светлотный взвешивающий коэффициент, который может быть равен 1.0, 1.5 и 0.67 соответственно для едва воспринимаемых, умеренных и боль-

ших цветовых отличий. Взвешивающий коэффициент насыщенности (c), который не представлен в данной формуле, всегда равен 1.0.

Прогнозирование феноменов

Пересмотренная LLAB-модель учитывает хроматическую адаптацию, светлотную индукцию, относительную яркость окружения, когнитивное обесцвечивание осветителя и эффект Ханта. Модель не в состоянии прогнозировать эффект Стивенса, неполноту хроматической адаптации, эффект Гельмгольца — Кольрауша, а также эффект Хельсона — Джадда.

LLAB последней редакции выдает предикторы светлоты, насыщенности, чистоты цвета, полноты цвета и цветового тона (Луо и Моровик, 1996), что исправило неестественную комбинацию атрибутов восприятия (светлота, полнота цвета, цветовой тон), имевшую место в оригинальной версии (Луо, Ло и Куо, 1996). Напомним, что естественные комбинации — это светлота, насыщенность и цветовой тон — или же: субъективная яркость, полнота цвета и цветовой тон.

В оригинальной формулировке LLAB-модель не могла вычислять соответствия по субъективной яркости/полноте цвета (или по светлоте/насыщенности) а могла рассчитывать лишь соответствие по светлоте/полноте цвета (что малоценно в реальной практике). Если согласованные цветовые стимулы были спрогнозированы при постоянной фотометрической яркости, то соответствия по светлоте/полноте цвета будут эквивалентны соответствиям по светлоте/насыщенности. Любопытно, что оригинальная формулировка LLAB не учитывает требований CIE TC1-34, предъявляемых к моделям цветового восприятия по обязательному наличию предикторов светлоты, насыщенности и цветового тона (данный недочет, напомним, в 1996 г. был выправлен Луо и Моровиком).

Таблица 14.3 содержит примеры вычислений LLAB-атрибутов восприятия по некоторым стимулам.

Почему не только LLAB-модель?

LLAB-модель удачна в том плане, что весьма проста, содержит достаточно точную модель адаптации, учитывает эффекты окружения и имеет надежную встроенную систему измерения цветовых отличий. Однако оригинальную версию LLAB нельзя назвать полноценной моделью цветового восприятия, поскольку она оперирует неестественной комбинацией его атрибутов (светлота, полнота цвета и цветовой тон), не имея при этом в своем составе предиктора насыщенности. Вторая редакция модели содержит предикторы как насыщенности, так и чистоты цвета.

LLAB имеет ряд преград к аналитической инверсии.

Также модель неспособна предсказывать неполноту хроматической адаптации, однако вторая версия LLAB содержит специальный D-коэффициент, позволяющий моделировать когнитивные эффекты, возникающие при смене носителя изображений.

Стоит отметить, что модель была протестирована только с теми данными,

Таблица 14.3 Примеры вычислений по LLAB-модели

Величина	Пример 1	Пример 2	Пример 3	Пример 4
X	19.01	57.06	3.53	19.01
Y	20.00	43.06	6.56	20.00
Z	21.78	31.96	2.14	21.78
X_0	95.05	95.05	109.85	109.85
Y_0	100.00	100.00	100.00	100.00
Z_0	108.88	108.88	35.58	35.58
L (cd/m^2)	318.31	31.83	318.31	31.83
Y_b	20.0	20.0	20.0	20.0
F_S	3.0	3.0	3.0	3.0
F_L	1.0	1.0	1.0	1.0
F_C	1.0	1.0	1.0	1.0
L_L	37.37	61.26	16.25	39.82
Ch_L	0.01	30.51	30.43	29.34
C_L	0.02	56.55	53.83	54.59
s_L	0.00	0.50	1.87	0.74
h_L	229.5	22.3	173.8	271.9
H_L	72B 28G	98R 2B	90G 10B	86B 14R
A_L	−0.01	52.33	−53.51	1.76
B_L	−0.01	21.43	5.83	−54.56

из которых и была получена (в основном по той причине, что CIE-модели были созданы несколько позже, чем была опубликована LLAB) — вполне возможно, что некоторые параметры модели, удачно подходящие к некоему одному набору данных, могут оказаться некорректными в отношении иных наборов.

Однако, благодаря тому, что модель основана на т.н. LUTCHI-данных (см. раздел 17.4. — *Прим. пер.*), в некоторых практических ситуациях она все-таки может оказаться весьма полезной.

15 МОДЕЛЬ CIECAM97s

Выход в свет первого издания нашей книги (1998) по времени совпал с моментом создания и публикации первой CIE-модели цветового восприятия (CIECAM97s). К тому времени стало окончательно ясно, что все заинтересованы в появлении на свет единой стандартной модели (правда, при этом было неясно, насколько эффективной окажется именно модель CIE). Промышленный запрос подтолкнул Международную комиссию по освещению (CIE) к созданию практичной и хорошо протестированной модели, которую в дальнейшем можно было бы рекомендовать как международный стандарт.[1] Такой моделью явилась CIECAM97s, представляющая собой серьезное достижение в деле моделирования цветового восприятия.

Текущая глава дает краткий обзор создания и развития CIECAM97s (краткий, поскольку сегодня уже действует ее усовершенствованный вариант — CIECAM02). Как будет показано в текущей главе, эксперимент CIE по созданию CIECAM97s оказался очень удачным, представляющим весьма прогрессивный этап в истории моделей цветового восприятия.

15.1 ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ, ЦЕЛИ И ПОДХОД

В марте 1996 г., в Вене, CIE проводила экспертный симпозиум «Стандарты цветовоспроизведения» (CIE, 1996). Форум охватил множество аспектов технологии воспроизведения изображений, по которым CIE могла бы предложить промышленности руководства и стандарты, но одним из важнейших итогов встречи стала идея создания универсальной модели цветового восприятия, предназначенной к широкому применению. Представители промышленности признали необходимость создания такой модели, но потребовали от руководства CIE утверждения ее единственного варианта, который мог бы использоваться всеми заинтересованными отраслями промышленности, дабы обеспечивать однородность результатов и совместимость различных компонентов современных медиасистем.

Требования к единой модели были сформулированы и подытожены в докладе Ханта (CIE, 1996), озаглавленном как «Назначение, развитие и будущее моделей цветового восприятия». Хант рассмотрел историческое развитие и сегодняшний статус различных моделей и сформулировал 12 требований к CIECAM97s, которые в дальнейшем послужили идеологической основой ее создания (CIE, 1996).

Хантовские тезисы таковы:

- ⇨ Модель, по возможности, должна охватывать все сферы своего потенциального применения, однако (в силу огромных сложностей в учете

---

[1] Подразумевается рекомендация, направляемая в ISO. — *Прим. пер.*

динамических эффектов) на данном этапе развития науки о цвете учитывается лишь статическая адаптация наблюдателя.

- ⇨ Модель должна работать в широком диапазоне интенсивностей стимулов: от очень темных (объектных) до очень ярких (самосветящихся). Поэтому функция динамического ответа должна иметь некий экстремум и не может быть простой логарифмической или степенной функцией.

- ⇨ Модель должна покрывать широкий диапазон адаптаций: от очень низкого, скотопического уровня (к примеру, адаптация при свете звезд), до очень высокого, фотопического (к примеру, адаптация к солнечному свету) — то есть, при прочих равных, в модель должен быть включен учет скотопического компонента. Однако, поскольку для большинства практических ситуаций учет палочкового зрения не столь важен, модель должна работать и в беспалочковом варианте.

- ⇨ Модель должна покрывать широкий диапазон условий просмотра, включающих фоны с различными коэффициентами яркости, а также темные, тусклые и усредненные окружения (учет разных окружений необходим, поскольку широко распространены проекционные и самосветящиеся дисплеи).

- ⇨ Для упрощения работы с моделью CIE $\bar{x}\ \bar{y}\ \bar{z}$- или $\bar{x}_{10}\bar{y}_{10}\bar{z}_{10}$-функции должны быть преобразованы в спектральные чувствительности колбочек. Для спектральной чувствительности палочек должна быть использована функция скотопической световой эффективности $V'(\lambda)$, но поскольку скотопические фотометрические данные зачастую недоступны, должны быть выработаны методы, обеспечивающие приблизительный расчет скотопических значений.

- ⇨ Модель должна учитывать различную степень адаптации (от полной до нулевой), а также, при необходимости, эффект Хельсона — Джадда.

- ⇨ Модель должна прогнозировать цветовой тон (его угол и квадратуру), субъективную яркость, светлоту, чистоту цвета, насыщенность и полноту цвета.

- ⇨ Модель должна быть способна работать в обратном направлении.

- ⇨ Модель не должна быть сложнее, чем необходимо для удовлетворения вышеперечисленным требованиям.

- ⇨ Любая упрощенная версия модели, предназначенная для профильного применения, должна в специфических условиях просмотра давать те же прогнозы восприятия, что и полная модель.

- ⇨ Модель должна прогнозировать цветовое восприятие не хуже, чем лю-

бая другая модель, оптимизированная для данной конкретной сферы применения.

- Модель должна работать также и в отношении изолированных стимулов (то есть наблюдаемых в темном окружении и изоляции от других цветовых стимулов).

В заключение симпозиум постановил, что CIE надлежит незамедлительно приступить к работе по созданию такой модели, дабы закончить ее до начала четырехлетнего юбилея AIC (Международной цветовой ассоциации), который должен был состояться в Киото в мае 1997 г. CIE решила, что для выполнения данной работы более всего подходит TC1-34, и на съезде 1-го подразделения CIE, состоявшемся в Готенбурге (1996), расширила полномочия комитета постановлением: «<...>рекомендовать единую модель цветового восприятия, предварительно согласовав ее с другими профильными техническими комитетами».

TC1-34 немедленно приступил к созданию двух вариантов модели восприятия: упрощенного (simple) и полного (comprehensive). Технический отчет об упрощенной версии (CIECAM97s) был опубликован CIE в 1998 г., но полная версия модели так и не была создана ввиду явно недостаточного спроса.

Члены TC1-34 Р.В.Г. Хант и М.Р. Луо взялись разработать первый комплект уравнений, который затем был представлен на рассмотрение комитета. Рабочая концепция TC1-34 при создании как полной CIE-модели, так и ее упрощенной версии, предназначенной для сугубо практических нужд, строго соответствовала двенадцати хантовским принципам, то есть общая концепция была ориентирована на разработку и полной модели (подобной модели Ханта), применимой к широкому диапазону феноменов цветового восприятия, и упрощенной (подобной RLAB), ориентированной на такие области применения, как аппаратно-независимое репродуцирование изображений. При этом обе версии должны были быть совместимыми друг с другом по ряду параметров.

В подготовке обеих версий были задействованы пересмотренные варианты хантовской модели, именуемые соответственно как «Bradford-Hunt 96S» (simple) и «Bradford-Hunt 96C» (comprehensive) и представляющие собой промежуточный этап формулировки CIECAM97s. Эти модели с любезного разрешения их автора (Хант, 1996) были включены в первую редакцию нашей книги (Фершильд, 1998).

«Bradford-Hunt 96S» и «Bradford-Hunt 96C» не были приняты TC1-34 в качестве CIE-моделей, однако для комитета они явились стартовой позицией, прекрасно проиллюстрировав, каким именно путем могут быть реализованы двенадцать хантовских принципов. Предполагалось, что хантовские модели будут подвергнуты частичной ревизии еще до их рассмотрения полным собранием комитета на торжествах в Киото.

Хант и Луо дважды выполнили необходимый пересмотр и вынесли оба варианта на предварительное рассмотрение TC1-34. Плюс к тому, М. Фершильд выполнил альтернативный, третий, пересмотр, а К. Ричер — четвертый. На встрече в Киото (май 1997 г.) были рассмотрены все четыре версии и было решено принять один из вариантов Ханта и Луо в качестве упрощенной версии

CIE-модели цветового восприятия (ей было присвоено название CIECAM97s), а формальное утверждение CIECAM97s и ее CIE-публикация состоялись в 1998 г.

Полная версия (CIECAM97c), являющаяся расширением CIECAM97s, как уже было сказано ранее, так и не была создана.

Ко всему прочему, Фершильдом был подготовлен существенно упрощенный, альтернативный вариант модели, предназначенный для ограниченных условий просмотра, который, однако, не был утвержден комитетом, поскольку, в отличие от CIECAM97s, оказался не расширяем до полной версии (а сегодня ясно, что он и не стоил потраченного времени). Тем не менее, модель, предложенная Фершильдом и получившая название «ZLAB», описана в разделе 15.7 текущей главы (поскольку показала свою пригодность для некоторых простых цветорепродукционных ситуаций).

15.2 ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В целях создания CIECAM97s (то есть упрощенной версии CIE-модели цветового восприятия) комитетом были выполнены небольшие, но весьма важные корректировки Bradford-Hunt 96S, суть которых состояла:

— в переформулировке системы, компенсирующей влияние окружения (была применена некая степенная функция, позволившая избежать появления предикторов согласованных стимулов с отрицательными CIE-трехстимульными значениями);

— в четком определении коэффициента уровня адаптации (D).

Следует отметить, что структура CIECAM97s — это труд многих ученых, исследующих цветовое восприятие человека, и данная модель, утвержденная TC1-34, — это лучшее, что есть сегодня[1]. Над различными аспектами модели трудились: Бартлесон, Бренеман, Фершильд, Эстевец, Хант, Лэм, Луо, Наятани, Ригг, Сэйм и Вальберг с сотрудниками. Поскольку расширенная версия модели так и не появилась на свет, читатели, заинтересованные в прогнозе цветового восприятия по экстремальным условиям просмотра (таких, как слепящие уровни яркости стимулов или, напротив, — низкоуровневые яркости, при которых активируется палочковый аппарат) или в прогнозе тонких феноменов (таких, как эффект Хельсона — Джадда), могут обратиться к хантовской модели, описанной в 12-й главе.

Входными данными модели CIECAM97s являются:

— общая фотометрическая яркость поля адаптации в cd/m^2 (обычно составляет 20% яркости белого в адаптационном поле) — L_A;

— относительные трехстимульные значения образца в исходных условиях — XYZ;

— относительные трехстимульные значения белого в исходных условиях — $X_W Y_W Z_W$;

[1] Фраза унаследована из 1-го издания «Моделей цветового восприятия», вышедшего в свет задолго до появления CIECAM02. — *Прим. пер.*

— относительная яркость фона в исходных условиях — Y_b.
Дополнительные константы:
— c — влияние окружения;
— N_c — коэффициент хроматической индукции;
— F_{LL} — коэффициент светлотного контраста;
— F — коэффициент степени адаптации
выбираются согласно указаниям таблицы 15.1.

Таблица 15.1 Входные параметры CIECAM97s

Условия просмотра	c	N_c	F_{LL}	F
Среднее окружение, образец захватывает >4°	0.69	1.0	0.0	1.0
Среднее окружение	0.69	1.0	1.0	1.0
Тусклое окружение	0.59	1.1	1.0	0.9
Темное окружение	0.525	0.8	1.0	0.9
Листовые слайды (в просмотровом устройстве)	0.41	0.8	1.0	0.9

15.3 МОДЕЛЬ АДАПТАЦИИ

Начальный этап расчета смены хроматической адаптации — это переход от исходных условий просмотра к эталонным условиям при равноэнергетическом осветителе (несмотря на то, что трехстимульные значения по эталонным условиям не присутствуют в явном виде): трехстимульные значения исследуемого образца и белой точки нормируются, а затем преобразовываются в спектрально-заостренные колбочковые ответы (уравнения 15.1 и 15.2):

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \mathbf{M}_B \begin{bmatrix} X/Y \\ Y/Y \\ Z/Y \end{bmatrix} \quad (15.1)$$

$$\mathbf{M}_B = \begin{bmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{bmatrix} \quad (15.2)$$

Расчет смены хроматической адаптации — это модифицированный фонкризовский расчет (выполняемый по типу преобразования координат цветности) со степенной нелинейностью в канале коротковолновой чувствительности (уравнения с 15.3 по 15.6):

$$R_c = \left[D(1.0/R_W) + 1 - D\right]R \quad (15.3)$$

$$G_c = \left[D(1.0/G_W) + 1 - D\right]G \quad (15.4)$$

$$B_c = \left[D(1.0/B_W^p) + 1 - D\right]|B|^p \qquad (15.5)$$

$$p = (B_W/1.0)^{0.0834} \qquad (15.6)$$

Для учета влияния уровня адаптации используется переменная D: она устанавливается на 1.0 при полной адаптации или когнитивном обесцвечивании осветителя, на 0.0 — при отсутствии адаптации и на некое промежуточное значение при неполной хроматической адаптации. Уравнение 15.7 позволяет вычислять промежуточное значение D для различных уровней яркости и для различных условий окружения:

$$D = F - F/\left[1 + 2(L_A^{1/4}) + (L_A^2)/300\right] \qquad (15.7)$$

Если в уравнении 15.5 переменная B оказалась отрицательной, то B_c тоже должна стать отрицательной. Подобные преобразования выполняются также и для белого (поскольку они понадобятся при дальнейших вычислениях), однако прежде чем приступать к ним, необходимо рассчитать ряд коэффициентов (уравнения 15.8–15.12):

$$k = 1/(5L_A + 1) \qquad (15.8)$$

$$F_L = 0.2k^4(5L_A) + 0.1(1-k^4)^2(5L_A)^{1/3} \qquad (15.9)$$

$$n = Y_b/Y_W \qquad (15.10)$$

$$N_{BB} = N_{CB} = 0.725(1/n)^{0.2} \qquad (15.11)$$

$$z = 1 + F_{LL}n^{1/2} \qquad (15.12)$$

где:

— n — коэффициент индукции фона;

— N_{bb} и N_{cb} — коэффициенты субъективно-яркостной и хроматической индукции фона;

— z — базовая степенная нелинейность.

Постадаптационные сигналы для исследуемого образца и исходного белого преобразовываются затем из заостренных колбочковых ответов в колбочковые ответы Ханта — Поинтера — Эстевец по уравнениям 15.13 и 15.14 (данное преобразование выполняется до нелинейной компрессии):

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \mathbf{M}_H \mathbf{M}_B^{-1} \begin{bmatrix} R_c Y \\ G_c Y \\ B_c Y \end{bmatrix} \qquad (15.13)$$

$$\mathbf{M}_{H} = \begin{bmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.00 & -0.0 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (15.14)$$

Постадаптационные колбочковые ответы (для исследуемого образца и белого) вычисляются по формулам с 15.15–15.17:

$$R'_{a} = \frac{40(F_{L}R'/100)^{0.73}}{\left[(F_{L}R'/100)^{0.73}+2\right]}+1 \quad (15.15)$$

$$G'_{a} = \frac{40(F_{L}G'/100)^{0.73}}{\left[(F_{L}G'/100)^{0.73}+2\right]}+1 \quad (15.16)$$

$$B'_{a} = \frac{40(F_{L}B'/100)^{0.73}}{\left[(F_{L}B'/100)^{0.73}+2\right]}+1 \quad (15.17)$$

15.4 КОРРЕЛЯТЫ ВОСПРИЯТИЯ

Предварительные красно-зеленые и желто-синие оппонентные размерности рассчитываются согласно формулам 15.18 и 15.19:

$$a = R'_{a} - 12G'_{a}/11 + B'_{a}/11 \quad (15.18)$$

$$b = (1/9)(R'_{a} + G'_{a} - 2B'_{a}) \quad (15.19)$$

Угол цветового тона (h) в CIECAM97s вычисляется из «a» и «b» по уравнению 15.20:

$$h = \tan^{-1}(b/a) \quad (15.20)$$

Квадратура цветового тона (H) и коэффициент оригинальности (e) рассчитываются из полученных значений цветового тона путем линейной интерполяции следующих значений однозначных цветовых тонов:

Красный: $h = 20.14^{\circ}$, $e = 0.8$, $H = 0$ или 400,

Желтый: $h = 90.00^{\circ}$, $e = 0.7$, $H = 100$,

Зеленый: $h = 164.25^{\circ}$, $e = 1.0$, $H = 200$,

Синий: $h = 237.53^{\circ}$, $e = 1.2$, $H = 300$.

Уравнения 15.21 и 15.22 иллюстрируют вычисление e и H для произвольного угла цветового тона, где подстрочные индексы «1» и «2» относятся к однозначным цветовым тонам, лежащим непосредственно выше и ниже интересующего угла:

$$e = e_{1} + (e_{2} - e_{1})(h - h_{1})/(h_{2} - h_{1}) \quad (15.21)$$

$$H = H_1 + \frac{100(h - h_1)/e_1}{(h - h_1)/e_1 + (h_2 - h)/e_2} \qquad (15.22)$$

Ахроматический ответ для исследуемого образца и белого вычисляется по формуле 15.23:

$$A = \left[2R'_\text{a} + G'_\text{a} + (1/20)B'_\text{a} - 2.05\right]N_\text{bb} \qquad (15.23)$$

Светлота (J) вычисляется из ахроматических сигналов образца (A) и белого (A_w) по формуле 15.24:

$$J = 100(A/A_\text{W})^{cz} \qquad (15.24)$$

Субъективная яркость (Q) вычисляется из светлоты и ахроматического ответа по белому с помощью уравнения 15.25:

$$Q = (1.24/c)(J/100)^{0.67}(A_\text{W} + 3)^{0.9} \qquad (15.25)$$

И наконец, чистота цвета (s), насыщенность (C) и полнота цвета (M) вычисляются по уравнениям 15.26–15.28 соответственно:

$$s = \frac{50(a^2 + b^2)^{1/2}100e(10/13)N_\text{c}N_\text{cb}}{R'_\text{a} + G'_\text{a} + (21/20)B'_\text{a}} \qquad (15.26)$$

$$C = 2.44s^{0.69}(J/100)^{0.67n}(1.64 - 0.29^n) \qquad (15.27)$$

$$M = CF_\text{L}^{0.15} \qquad (15.28)$$

15.5 ОБРАТНАЯ МОДЕЛЬ

Модель CIECAM97s сравнительно легко инвертируема, но требует при этом некоторой аппроксимации, поскольку вычисление величины Y при инверсии затруднено (шаг 8). Процесс инверсии строится на том, что, отталкиваясь от значений светлоты (J), насыщенности (C) и угла цветового тона (h), последовательно выполняются следующие шаги:

1. Получение A из J.
2. Получение e из h.
3. Вычисление s из C и J.
4. Вычисление a и b из s, h и e.
5. Вычисление R'_a, G'_a и B'_a из A, a и b.
6. Вычисление R', G' и B' из R'_a, G'_a и B'_a.
7. Вычисление $R_\text{c}Y$, $G_\text{c}Y$ и $B_\text{c}Y$ из R', G' и B'.
8. Приблизительное вычисление Y из $R_\text{c}Y$, $G_\text{c}Y$ и $B_\text{c}Y$ с использованием матрицы $\mathbf{M}_\text{B}^{-1}$.

9. Вычисление R_c, G_c и B_c из R_cY, G_cY, B_cY и Y.
10. Вычисление R, G и B из R_c, G_c и B_c.
11. Вычисление X, Y и Z из R, G, B и Y.

Даже несмотря на то, что CIECAM97s трудно обратима аналитически, ее инверсия намного проще и точнее, чем инверсия некоторых предыдущих моделей, благодаря чему практическая ценность CIECAM97s намного выше. Детальное описание процесса инверсии CIECAM97s можно найти на www.cis.rit.edu/Fairchild/CAM.html.

15.6 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФЕНОМЕНОВ

Несмотря на свою простоту, в плане прогнозирования визуальных феноменов CIECAM97s является вполне полноценной моделью: она включает в себя корреляты по всем главным размерностям восприятия (светлоте, субъективной яркости, насыщенности, полноте цвета, чистоте цвета и цветовому тону), а также способна прогнозировать широкий диапазон эффектов, зависимых от адаптации, окружения и яркости. Модель неприменима к экстремально высоким или экстремально низким уровням яркости, то есть к условиям, нетипичным для достоверной цветовой оценки.

В таблице 15.2 даны четыре примера вычислений по модели CIECAM97s.

15.7 ZLAB-МОДЕЛЬ

Из моделей, представленных на рассмотрение TC1-34, была получена некая весьма упрощенная модель, но комитет решил, что будет рекомендовать к использованию другую, более сложную (CIECAM97s). Отвергнутую модель автор назвал ZLAB (Фершильд, 1998).

ZLAB была выведена из CIECAM97s, LLAB и RLAB-моделей с существенной добавкой из работы Луо и Ханта, представленной на рассмотрение TC1-34. Напомним, что ZLAB была создана в расчете на то, что ее работа будет не хуже, чем работа CIECAM97s, но в определенных и весьма ограниченных условиях просмотра. Ограничения заключались в сужении диапазона промежуточных адаптирующих яркостей, поскольку гиперболическая нелинейность была заменена на корнеквадратную функцию, хорошо аппроксимирующую функцию гиперболическую для промежуточных уровней фотометрической яркости.

Дополнительным ограничением ZLAB-модели является приведение всех фонов к средне-серому, что было сделано для упрощения вычислений. Наконец, ZLAB ограничивается прогнозированием относительных атрибутов восприятия — светлоты, насыщенности, чистоты цвета и цветового тона, и не может выдавать предикторы полноты цвета и субъективной яркости, поскольку с целью упрощения уравнений из модели был удален учет большинства яркостно-зависимых эффектов.

По большинству согласованных цветовых стимулов ZLAB работает эквивалентно CIECAM97s, поскольку использует тот же самый расчет смены хрома-

Таблица 15.2 Примеры вычислений по CIECAM97s

Величина	Пример 1	Пример 2	Пример 3	Пример 4
X	19.01	57.06	3.53	19.01
Y	20.00	43.06	6.56	20.00
Z	21.78	31.96	2.14	21.78
X_W	95.05	95.05	109.85	109.85
Y_W	100.00	100.00	100.00	100.00
Z_W	108.88	108.88	35.58	35.58
L_A	318.31	31.83	318.31	31.83
F	1.0	1.0	1.0	1.0
D	0.997	0.890	0.997	0.890
Y_b	20.0	20.0	20.0	20.0
N_c	1.0	1.0	1.0	1.0
F_{LL}	1.0	1.0	1.0	1.0
F_L	1.17	0.54	1.17	0.54
N_{bb}, N_{cb}	1.0	1.0	1.0	1.0
h	212.3	19.3	175.4	250.8
H	269.5	399.4	217.7	306.9
H_C	70B 30G	99R 1B	82G 18B	93B 7R
J	42.44	65.27	21.04	39.88
Q	32.86	31.88	20.54	22.96
s	0.15	146.98	232.18	180.56
C	0.50	61.96	72.99	66.85
M	0.51	56.52	74.70	60.98

тической адаптации. Сказанное касается и шкалирования атрибутов цветового восприятия.

ZLAB нашла свое применение в работе с изображениями, поскольку гамут-мэппинг и практически полное отсутствие контроля за условиями просмотра в данной сфере — это факторы, избавляющие от необходимости использования сложных моделей восприятия.

Входные данные

Входные данные ZLAB:

— абсолютная фотометрическая яркость адаптирующего поля (L_A), равная 0.2 от яркости условного белого эталона;

— трехстимульные значения образца в исходных условиях (XYZ);

— трехстимульные значения белого в исходных условиях ($X_W Y_W Z_W$).

Хроматическая адаптация

Для перехода от исходных условий просмотра к согласованным стимулам при эталонных условиях (равноэнергетический осветитель) в ZLAB (как и в CIECAM97s) используется брэдфордский расчет смены хроматической адаптации: сначала все три набора трехстимульных значений нормируются и преобразовываются в заостренные колбочковые ответы с использованием брэдфордской матрицы (уравнения 15.29–15.30):

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X/Y \\ Y/Y \\ Z/Y \end{bmatrix} \tag{15.29}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{bmatrix} \tag{15.30}$$

Расчет смены хроматической адаптации — это модифицированный фонкризовский расчет (выполняемый по типу преобразования координат цветности) со степенной нелинейностью в канале коротковолновой чувствительности (уравнения с 15.31 по 15.34):

$$R_c = [D(1.0/R_W) + 1 - D]R \tag{15.31}$$

$$G_c = [D(1.0/G_W) + 1 - D]G \tag{15.32}$$

$$B_c = [D(1.0/B_W^p) + 1 - D]|B|^p \tag{15.33}$$

$$p = (B_W/1.0)^{0.0834} \tag{15.34}$$

Для спецификации уровня адаптации используется переменная D: она устанавливается на 1.0 при полной адаптации или когнитивном обесцвечивании осветителя, на 0.0 — при отсутствии адаптации и на некое промежуточное значение при неполной хроматической адаптации.

Переменную D можно оставить как эмпирический параметр или вычислить по уравнению 15.35 (как в CIECAM97s) при $F = 1.0$ для среднего окружения и $F = 0.9$ для тусклого или темного окружений. Если используется уравнение 15.35, то, согласно требованиям ZLAB, в вычисления следует вводить только абсолютную фотометрическую яркость (уравнение 15.37):

$$D = F - F/[1 + 2(L_A^{1/4}) + (L_A^2)/300] \tag{15.35}$$

Если переменная B оказывается отрицательной, то и B_c тоже должна быть отрицательной. R_c, G_c и B_c представляют стимул, согласованный с исследуемым, наблюдаемым в эталонных условиях просмотра (E-осветитель).

Финальный этап расчета смены хроматической адаптации заключается в конверсии заостренных колбочковых ответов назад, в CIE XYZ-трехстимульные значения для эталонных условий просмотра (уравнение 15.36):

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} R_c Y \\ G_c Y \\ B_c Y \end{bmatrix} \quad (15.36)$$

Корреляты восприятия

Оппонентные ответы вычисляются с использованием модифицированных CIELAB-уравнений, содержащих степенную функцию, показатель которой определяется относительной яркостью окружения. Оппонентные ответы получают из упрощенного варианта CIECAM97s на том основании, что гиперболическая нелинейная функция, заложенная в CIECAM97s, может быть аппроксимирована функцией корня квадратного для промежуточных яркостей (благодаря чему оппонентные ответы редуцируются до уравнений 15.37 и 15.38):

$$A = 500\left[(X_c/100)^{\frac{1}{2\sigma}} - (Y_c/100)^{\frac{1}{2\sigma}}\right] \quad (15.37)$$

$$B = 200\left[(Y_c/100)^{\frac{1}{2\sigma}} - (Z_c/100)^{\frac{1}{2\sigma}}\right] \quad (15.38)$$

Степени функций напрямую связаны с таковыми в CIECAM97s, что демонстрирует таблица 15.3, в которой значения $1/\sigma$, взятые из CIECAM97s, были модифицированы в ZLAB до $1/2\sigma$, дабы внедрить корнеквадратную аппроксимацию исходной гиперболической нелинейности.

Угол цветового тона вычисляется стандартным путем (уравнение 15.39):

$$h^z = \tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right) \quad (15.39)$$

Таблица 15.3 Параметры окружения в ZLAB

	Окружение		
	Среднее	Тусклое	Темное
$1/\sigma$	0.69	0.59	0.525
$1/2\sigma$	0.345	0.245	0.2625

Состав цветового тона определяется линейной интерполяцией углов однозначных цветовых тонов: $h_r^z = 25°$, $h_y^z = 93°$, $h_g^z = 165°$, и $h_b^z = 254°$.

Коэффициент фотометрической яркости фона в ZLAB всегда равен 20%, то есть z-параметр CIECAM97s остается константным и равным 1.45, а светлота (L^z) выражается уравнением 15.40:

$$L^z = 100(Y_c / 100)^{\frac{1.45}{2\sigma}} \tag{15.40}$$

Насыщенность (C^z) вычисляется так же, как в LLAB-модели (уравнение 15.41), а чистота цвета (s^z) — как отношение насыщенности к светлоте (уравнение 15.42):

$$C^z = 25\ln[1 + 0.05(A^2 + B^2)^{1/2}] \tag{15.41}$$

$$s^z = C^z / L^z \tag{15.42}$$

Прямоугольные координаты, необходимые для построения цветового пространства, можно легко получить из C^z и h^z по уравнениям 15.43 и 15.44:

$$a^z = C^z \cos(h^z) \tag{15.43}$$

$$b^z = C^z \sin(h^z) \tag{15.44}$$

Обратная модель

Инверсия ZLAB предельно проста — отталкиваясь от значений светлоты (L^z), насыщенности (C^z) и угла цветового тона (h^z), последовательно выполняются следующие шаги:

1. Вычисление $(A^2 + B^2)^{1/2}$ из C^z.
2. Вычисление A и B из $(A^2 + B^2)^{1/2}$ и h^z.
3. Вычисление X_c, Y_c и Z_c из L^z, A и B.
4. Вычисление R_c, G_c и B_c из X_c, Y_c и Z_c.
5. Вычисление R, G и B из R_c, G_c и B_c.
6. Вычисление X, Y и Z из R, G и B.

15.8 ПОЧЕМУ НЕ ТОЛЬКО CIECAM97s?

То, что TC1-34 справился с поставленной задачей и создал CIECAM97s в течение всего лишь одного года, — это воистину беспрецедентный случай. В первом издании «Моделей» было высказано предположение, что в процессе утверждения CIE не будет вносить в CIECAM97s никаких изменений, но важно отметить, что при этом CIECAM97s изначально рассматривалась как промежуточная модель, предполагающая возможный пересмотр по мере укрепления ее теоретического фундамента и поступления новых данных.

Реакция промышленности на CIECAM97s была бурной и радостной, в особенности в сфере работы с изображениями. Вместе с тем, активное использование CIECAM97s и непрекращающиеся научные изыскания в этой области очень быстро привели к пониманию функциональной ограниченности модели. Плюс к тому, CIECAM97s оказалась слишком сложна для некоторых прикладных ситуаций (для которых вполне могут подойти такие простые модели, как ZLAB, RLAB или даже тот расчет смены хроматической адаптации, что использован в CIELAB). Также очень быстро появились дополнительные данные, необходимые для дальнейшего совершенствования модели: громкий успех CIECAM97s заставил исследователей и инженеров обратить на нее самое пристальное внимание, благодаря чему стало возможным дальнейшее интенсивное развитие модели. Плодом коллективной работы явилась недавняя публикация CIECAM02, которой посвящена 16-ая глава нашей книги.

Итак, появление CIECAM02 — это уже повод к тому, чтобы отказаться от использования CIECAM97s: модель CIECAM02 ощутимо проще по структуре и много лучше по исполнению.

16 МОДЕЛЬ CIECAM02

Успех CIECAM97s был огромен. Но почему же тогда появилась CIEAM02? Дело в том, что публикация первой CIE-модели, состоявшаяся в 1997 г. (что отмечено в ее имени — CIECAM97s), дала мощный толчок естественному развитию моделей цветового восприятия: удача вдохновила исследователей и практиков на дальнейшие усилия по созданию единой универсальной модели, и эти усилия довольно быстро привели к идее целесообразности совершенствования CIECAM97s, итогом которого явилась гораздо более простая и эффективная модель CIECAM02.

Итак, в текущей главе мы будем говорить о создании и внутреннем устройстве CIECAM02 — сегодняшней CIE-модели цветового восприятия, которая в течение достаточно долгого времени будет оставаться ведущей моделью.

16.1 ЦЕЛИ И ПОДХОД

Как только CIECAM97s была опубликована, она сразу подверглась тщательному анализу, за которым последовали предложения по усовершенствованию как самоей модели, так и ее отдельных элементов.

В период формирования 8-го подразделения CIE («Технология изображений») был учрежден его первый технический комитет — CIE TC8-01 «Моделирование цветового восприятия в системах управления цветовоспроизведением» (под председательством Натэна Морони). Деятельность комитета была нацелена на пересмотр CIECAM97s и возможное создание новой модели. Конечным результатом работы TC8-01 по сбору и анализу поступивших рационализаторских предложений явились создание и публикация новой версии модели цветового восприятия — CIECAM02 (Морони и колл, 2002; CIE, 2004). (Отметим, что в названии модели отсутствует концевая литера «s», поскольку изначально не было намерения создавать полную версию, и, в частности, по тем же причинам, по каким не была построена CIECAM97c.)

Комитету было предложено большое число потенциальных усовершенствований CIECAM97s, которые от имени TC8-01 были сведены Фершильдом (2001) в единую публикацию. Предложения, которые были учтены и в конечном счете включены в CIECAM02 следующие:

— линеаризация расчета смены хроматической адаптации с целью упрощения модели и облегчения ее аналитической инверсии (Финлейсон и Дрю, 1999; Финлейсон и Зюструнк, 2000; Ли и колл., 2000);

— исправление ошибок в системе учета эффектов окружения (Ли и колл., 1999; Ли и колл., 2000; Морони, 2002);

— коррекция шкалы светлоты по условному идеально-черному стимулу (Ли и колл., 1999; Ли и колл., 2000; Морони, 2002);

— коррекция шкалы насыщенности в отношении околонейтральных (низконасыщенных) цветов (Вибль и Фершильд, 2000; Ньюман и Пиротта, 2000);

— внедрение непрерывной переменной, отвечающей за компенсацию эффектов окружения (Фершильд, 1995, 1996);

— модификация функции нелинейной компрессии для облегчения и улучшения расчета коррелятов чистоты цвета (Хант и колл., 2003).

После тщательного анализа всех предложенных исправлений TC8-01 свел их в единый набор новых уравнений и позиционировал новую модель (Морони и колл., 2002; CIE, 2004).

Как напоминание о том, что в психофизике цветового восприятия и его моделировании еще многое предстоит изучить, в названии модели значится год ее создания.

Короче говоря, CIECAM02 проста по структуре, легка в инверсии и в отношении большинства доступных данных столь же (если не более) удачна, чем CIECAM97s . То есть, CIECAM02 по всем параметрам и во всех ситуациях полностью заменяет собой CIECAM97s.

Ниже мы рассмотрим функциональную структуру и методику практического применения CIECAM02.

16.2 ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Входные данные CIECAM02 — это:

— трехстимульные значения исследуемого стимула (XYZ);

— трехстимульные значения белой точки ($X_W Y_W Z_W$);

— адаптирующая фотометрическая яркость (L_A) в cd/m^2 (чаще всего приравнивается к 20% яркости белой точки сцены);

— относительная фотометрическая яркость окружения (темное, тусклое, среднее);

— решение о том, имеет ли место когнитивное обесцвечивание осветителя.

Окружение (по критерию относительной яркости) берется *средним* для отражающих отпечатков, *тусклым* для CRT-мониторов (и телевизоров) и *темным* для проекционного показа слайдов (при условии, что показ организован с помощью типичного оборудования). Окружение непосредственно не связано с носителем — это означает, что, к примеру, оттиски можно рассматривать и в темном окружении, а проекционный показ слайдов вести в окружении среднем.

Считается, что когнитивное обесцвечивание осветителя возникает в отношении объектных цветовых стимулов, таких, как отпечатки, и не возникает в отношении эмиссионных дисплеев, таких, как CRT-мониторы. Когда когнитивное обесцвечивание осветителя имеет место, D-коэффициент устанавливается на 1.0, а прочие возможные его значения высчитываются согласно разделу 16.3.

После того как выбрана относительная яркость окружения, по таблице 16.1 выбирают степень нелинейности (c), а также величины коэффициентов индукции окружения (N_c и F). В CIECAM02 по параметрам N_c и F допускается использование промежуточных значений: если таковые необходимы, то выбирают не-

Таблица 16.1 Входные параметры CIECAM02

Условия просмотра	c	N_c	F
Среднее окружение	0.69	1.0	1.0
Тусклое окружение	0.59	0.9	0.9
Темное окружение	0.525	0.8	0.8

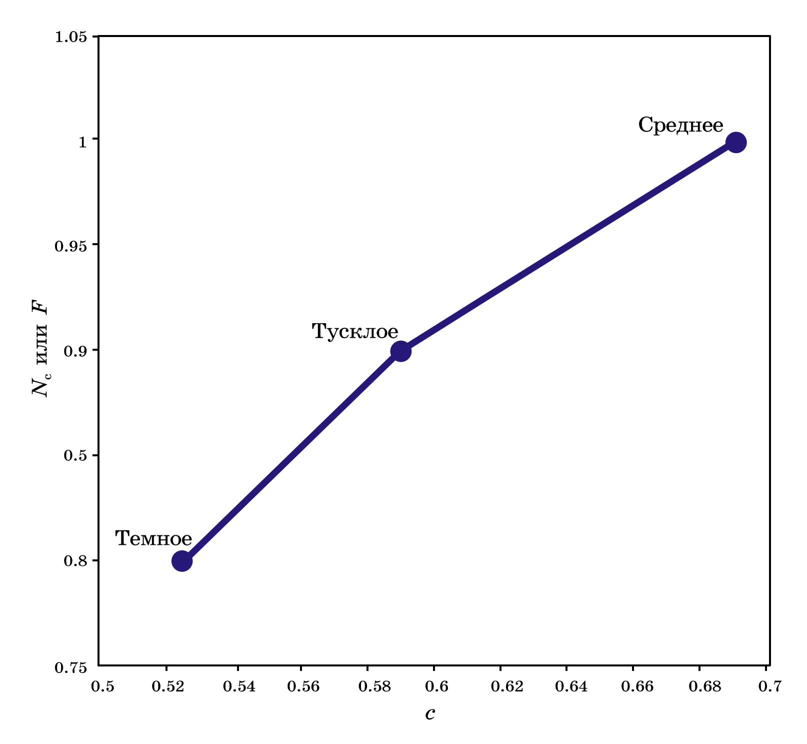


Рис. 16.1 Линейные взаимоотношения между параметрами окружения, используемые для вычисления промежуточных значений непрерывных переменных.

кое промежуточное значение «c» и путем линейной интерполяции вычисляют соответствующие ему промежуточные значения N_c и F (рис. 16.1). Отметим, что данные параметры в сравнении с CIECAM97s слегка откорректированы, а количество возможных условий сокращено до минимально необходимого.

16.3 МОДЕЛЬ АДАПТАЦИИ

Одним из наиболее существенных отличий CIECAM02 от CIECAM97s является использование линейного расчета смены хроматической адаптации фонкризовского типа (детально описано в 9-й главе), в результате чего не только сама модель (при неизменном ее качестве) стала проще (Калабрия и Фершильд, 2001), но также упростилась и ее аналитическая инверсия (еще одно серьезное усовершенствование CIECAM02 в сравнении с CIECAM97s).

Расчет начинается с конверсии CIE-трехстимульных значений в *RGB*-ответы, основанные на оптимизированном матричном преобразовании M_{CAT02}

(уравнения 16.1 и 16.2). Исходные трехстимульные значения обычно вычисляются по Стандартному колориметрическому наблюдателю CIE 1931 (2°) и шкалируются в диапазон от 0 до 100 (но не от 0 до 1.0). Такое же преобразование должно быть выполнено и в отношении трехстимульных значений адаптирующего стимула.

$$\begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix} = \mathbf{M}_{\mathrm{CAT02}} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \tag{16.1}$$

$$\mathbf{M}_{\mathrm{CAT02}} = \begin{vmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{vmatrix} \tag{16.2}$$

Преобразование в колбочковые ответы аналогично таковому в хантовской модели: матрица $\mathbf{M}_{\mathrm{CAT02}}$ нормирована так, что трехстимульные значения по равноэнергетическому осветителю ($X = Y = Z = 100$) выдают равные колбочковые ответы ($L = M = S = 100$).

D-коэффициент (уровень адаптации) вычисляется, согласно уравнению 16.3, как функция от адаптирующей яркости (L_A) и от коэффициента индукции окружения (F) — но если предполагается полное когнитивное обесцвечивание осветителя, то D устанавливается на 1.0. Теоретически D лежит в диапазоне от 1.0 (для полной адаптации) до 0.0 (отсутствие адаптации), однако на практике оно редко опускается ниже 0.6.

$$D = F\left[1 - \left(\frac{1}{3.6}\right)e^{\left(\frac{-(L_A+42)}{92}\right)}\right] \tag{16.3}$$

После того как D-коэффициент установлен, трехстимульные значения исследуемого цветового стимула конвертируются по уравнениям 16.4–16.6 в адаптированные трехстимульные ответы $R_C G_C B_C$, представляющие согласованные цветовые стимулы в эталонных условиях просмотра (равноэнергетический осветитель):

$$R_C = [(100D / R_W + (1 - D)]R \tag{16.4}$$

$$G_C = [(100D / G_W + (1 - D)]G \tag{16.5}$$

$$B_C = [(100D / B_W + (1 - D)]B \tag{16.6}$$

где $R_W G_W B_W$ — трехстимульные ответы по адаптирующему белому.

Примечание к расчету смены хроматической адаптации в CIECAM02

Уравнения 16.4–16.6 представляют расчет смены хроматической адаптации CIECAM02 в общем виде. Расчет смены хроматической адаптации, встроенный в CIECAM02 — это простой фонкризовский расчет, подразумевающий «равноэнергетические» эталонные условия при неполной адаптации. Модель смены адаптации может использоваться самостоятельно, независимо от самоей CIECAM02, и без шкалирования исходных трехстимульных значений в диапазон от 0 до 100 (CIECAM02) или, реже, от 0 до 1.0.

Уравнения 16.4–16.6 рекомендуется использовать во всех сферах применения CIECAM02, дабы свести к минимуму вероятность возможной путаницы; однако CIE (2004) в техническом отчете, посвященном CIECAM02, предлагает несколько иные уравнения (16.4a–16.6a):

$$R_C = [(Y_W D / R_W + (1 - D)]R \tag{16.4a}$$

$$G_C = [(Y_W D / G_W + (1 - D)]G \tag{16.5a}$$

$$B_C = [(Y_W D / B_W + (1 - D)]B \tag{16.6a}$$

Поскольку Y_W — это трехстимульное Y-значение условного белого эталона (обычно равное 100), оба набора уравнений идентичны. Однако иногда Y_W берется отличным от 100, например при работе с отражающими отпечатками, когда под белым подразумевается бумага, а не идеальный отражающий рассеиватель. Казалось бы, коэффициент Y_W уравнений 16.4a–16.6a должен учитывать изменения стимула, объявленного белым, однако нельзя забывать о том, что необходимая нормировка уже встроена в обсуждаемые уравнения в виде R_W, G_W и B_W, а переменная Y_W на самом деле не преследует какой-либо серьезной цели, являясь рудиментом промежуточной формулировки модели (который, к сожалению, к моменту публикации технического отчета CIE оказался не откорректированным). Страшного в этом ничего нет: влияние переменной на финальный расчет коррелятов восприятия очень мало, поскольку шкалирование восприятия относительно белой точки завершается в дальнейших уравнениях CIECAM02 (например, уравнение светлоты J).

Отметим, что преобразование по уравнениям 16.4a–16.6a жестко привязано к CIECAM02, и если пренебречь этим обстоятельством, мы можем получить противоречивые результаты (например, белый при неких одних условиях просмотра не окажется «посаженным» на белый при других условиях).

Если модель смены адаптации используется отдельно от полной CIECAM02, то для получения корректных результатов должны быть задействованы уравнения 16.4–16.6. Следует отметить также, что Y_W уравнений 16.4a–16.6a не является нормирующим коэффициентом для трехстимульных значений (фактически он выполняет обратное действие), поэтому входные значения CIECAM02 должны быть заранее шкалированы в диапазон от 0 до 100.

Оставшаяся часть модели адаптации, задействованной в CIECAM02

Следующий шаг в расчете хроматической адаптации — это вычисление нескольких промежуточных компонентов (необходимых для дальнейших расчетов и зависящих от условий просмотра):

— коэффициента адаптации по фотопической яркости (F_L);

— коэффициентов хроматической (N_{cb}) и субъективнояркостной (N_{bb}) индукций фона;

— базовой степенной нелинейности z.

Все четыре параметра зависят от относительной яркости фона (Y_b) и вычисляются по уравнениям 16.7–16.11:

$$k = 1/(5L_A + 1) \tag{16.7}$$

$$F_L = 0.2k^4(5L_A) + 0.1(1-k^4)^2(5L_A)^{1/3} \tag{16.8}$$

$$n = \frac{Y_b}{Y_W} \tag{16.9}$$

$$N_{bb} = N_{cb} = 0.725(1/n)^{0.2} \tag{16.10}$$

$$z = 1.48 + \sqrt{n} \tag{16.11}$$

Далее следует нелинейная компрессия, прежде которой адаптированные *RGB*-ответы конвертируются из $\mathbf{M}_{CAT02}$ в фундаментальные колбочковые ответы Ханта — Поинтера — Эстевец (которые, как мы знаем, ближе всего к реальным колбочковым ответам). Данное преобразование представлено уравнениями 16.12–16.14, и о нем можно говорить скорее как о конверсии из системы CAT02-*RGB* назад, к CIE-трехстимульным значениям, а не к колбочковым ответам.

$$\begin{vmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{vmatrix} = \mathbf{M}_{HPE}\mathbf{M}_{CAT02}^{-1}\begin{vmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{vmatrix} \tag{16.12}$$

$$\mathbf{M}_{HPE} = \begin{vmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.00000 & 0.00000 & 1.00000 \end{vmatrix} \tag{16.13}$$

$$\mathbf{M}_{CAT02}^{-1} = \begin{vmatrix} 1.096124 & -0.278869 & 0.182745 \\ 0.454369 & 0.473533 & 0.072098 \\ -0.009628 & -0.005698 & 1.015326 \end{vmatrix} \tag{16.14}$$

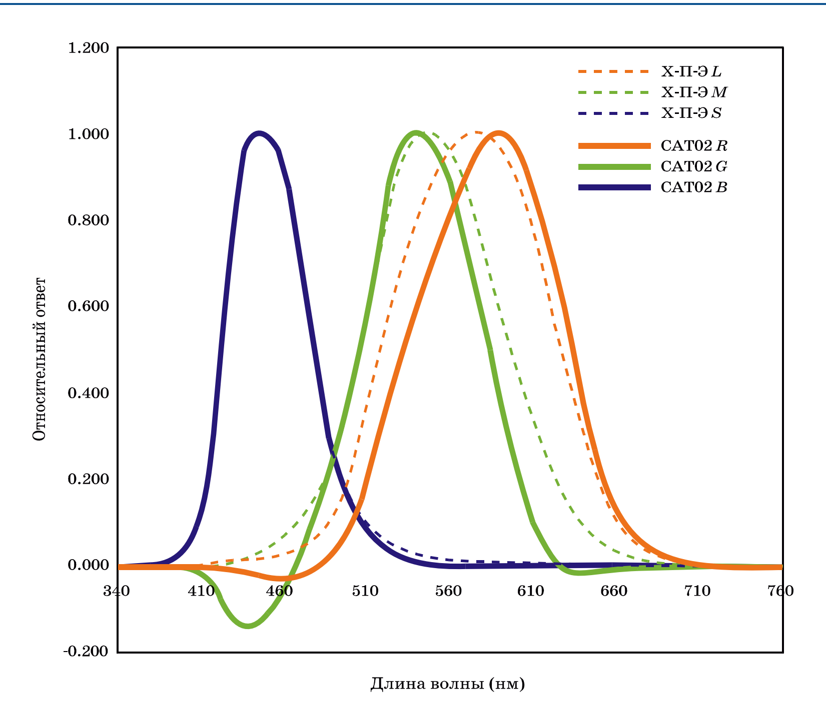


Рис. 16.2 Относительные спектральные чувствительности $\mathbf{M}_{\mathrm{CAT02}}$ в сравнении с фундаментальными «колбочковыми чувствительностями» Ханта — Поинтера — Эстевец. Отметим, что оба набора являются результатом простого линейного преобразования функций цветового соответствия CIE 2°.

Относительные спектральные чувствительности CAT02-системы и фундаментальные «колбочковые ответы» Ханта — Поинтера — Эстевец показаны на рис. 16.2.

Постадаптационные нелинейности аналогичны таковым в CIECAM97s, но при этом слегка усовершенствованы в плане упрощения степенного ответа в широком динамическом диапазоне (что в дальнейшем облегчает расчет чистоты цвета). В большей части своего диапазона данные функции подобны простым корнеквадратным функциям (уравнения 16.15–16.17):

$$R'_{\mathrm{a}} = \frac{400(F_{\mathrm{L}}R'/100)^{0.42}}{27.13+(F_{\mathrm{L}}R'/100)^{0.42}} + 0.1 \qquad (16.15)$$

$$G'_{\mathrm{a}} = \frac{400(F_{\mathrm{L}}G'/100)^{0.42}}{27.13+(F_{\mathrm{L}}G'/100)^{0.42}} + 0.1 \qquad (16.16)$$

$$B'_{\mathrm{a}} = \frac{400(F_{\mathrm{L}}B'/100)^{0.42}}{27.13+(F_{\mathrm{L}}B'/100)^{0.42}} + 0.1 \qquad (16.17)$$

Полученные значения используются затем для расчета оппонентных цветовых ответов и коррелятов цветового восприятия.

16.4 ОППОНЕНТНЫЕ ЦВЕТОВЫЕ РАЗМЕРНОСТИ

В CIECAM02 исходные оппонентные ответы вычисляются по уравнениям 16.18–16.19:

$$a = R'_a - 12G'_a / 11 + B'_a / 11 \tag{16.18}$$

$$b = (1/9)(R'_a + G'_a - 2B'_a) \tag{16.19}$$

16.5 ЦВЕТОВОЙ ТОН

Угол цветового тона в пространстве CIECAM02 вычисляется аналогично CIELAB: h выражен в градусах (от 0° до 360°), отсчитываемых от положительной a-оси (уравнение 16.20):

$$h = \tan^{-1}(b/a) \tag{16.20}$$

Следующий шаг: вычисление коэффициента оригинальности (e_t), который аналогичен таковому в CIECAM97s, но при этом рассчитывается аналитически (уравнение 16.21):

$$e_t = 1/4\left[\cos\left(h\frac{\pi}{180} + 2\right) + 3.8\right] \tag{16.21}$$

Квадратуру цветового тона (H) и состав цветового тона (H_C) определяют по таблице 16.2, задействуя при этом уравнение 16.22:

$$H = H_i + \frac{100(h - h_i)/e_i}{(h - h_i)/e_i + (h_{i+1} - h)/e_{i+1}} \tag{16.22}$$

16.6 СВЕТЛОТА

Исходный ахроматический ответ вычисляется как взвешенная сумма делинеаризованных колбочковых ответов, модифицированных с помощью коэффициента субъективнояркостной индукции фона (уравнение 16.23). Аналогичная величина должна быть высчитана для белого, дабы облегчить расчет светлоты и субъективной яркости.

$$A = [2R'_a + G'_a + (1/20)B'_a - 0.305]N_{bb} \tag{16.23}$$

Светлота (J) легко высчитывается из ахроматического ответа (A), ахроматического ответа по белому (A_W) и базовой степени — z (уравнение 16.24):

$$J = 100(A/A_W)^{cz} \tag{16.24}$$

Таблица 16.2 Данные, необходимые для конверсии угла цветового тона в его квадратуру

	Красный	Желтый	Зеленый	Синий	Красный
i	1	2	3	4	5
h_i	20.14	90.00	164.25	237.53	380.14
e_i	0.8	0.7	1.0	1.2	0.8
H_i	0	100	200	300	400

16.7 СУБЪЕКТИВНАЯ ЯРКОСТЬ

Коррелят субъективной яркости (Q) в CIECAM02 рассчитывается из светлоты (J), ахроматического ответа по белому (A_W), коэффициента окружения (c) и коэффициента адаптации по фотопической яркости (F_L) согласно уравнению 16.25:

$$Q = (4/c)\sqrt{J/100}(A_W + 4)F_L^{0.25} \tag{16.25}$$

16.8 НАСЫЩЕННОСТЬ

Насыщенность, полнота цвета и чистота цвета зависят от некоей промежуточной величины t, которая в свою очередь зависима от коэффициентов хроматической индукции окружения и фона (N_c и N_{cb}), а также от коэффициента оригинальности (e_t). Расчет t выполняется по формуле 16.26:

$$t = \frac{(50000/13)N_c N_{cb} e_t \sqrt{a^2 + b^2}}{R'_a + G'_a + (21/20)B'_a} \tag{16.26}$$

Насыщенность вычисляется по уравнению 16.27 умножением слегка нелинейной t на корень квадратный из светлоты (J), при некоторой поправке (n) на фон. Данный расчет (как и в большинстве моделей) основан на сугубо эмпирической подгонке результатов экспериментов по шкалированию цветового восприятия.

$$C = t^{0.9}\sqrt{J/100}(1.64 - 0.29^n)^{0.73} \tag{16.27}$$

16.9 ПОЛНОТА ЦВЕТА

Коррелят полноты цвета в CIECAM02 вычисляется согласно уравнению 16.28 путем умножения предиктора насыщенности (C) на корень четвертой степени коэффициента адаптации по фотопической яркости (F_L). Такой расчет оправдан, поскольку полнота цвета, зависящая от насыщенности, растет по мере роста адаптирующей яркости (в то время как сама насыщенность относительно постоянна):

$$M = CF_L^{0.25} \tag{16.28}$$

16.10 ЧИСТОТА ЦВЕТА

Предиктор чистоты цвета рассчитывается в CIECAM02 просто и логично — как корень квадратный из отношения полноты цвета к субъективной яркости (уравнение 16.29), что аналогично CIE-определению чистоты цвета (отношение полноты цвета стимула к его субъективной яркости):

$$s = 100\sqrt{M / Q} \quad (16.29)$$

16.11 ДЕКАРТОВЫ КООРДИНАТЫ

Цветовые пространства моделей восприятия обычно описывают в логике цилиндрических координат: светлота, насыщенность и цветовой тон (JCh), или: субъективная яркость, полнота цвета и цветовой тон (QMh). Однако в некоторых случаях удобнее пользоваться декартовыми координатами; но поскольку переход к декартовым координатам — это простое преобразование, в CIECAM97s оно специально не оговаривалось. Здесь мы приводим уравнения расчета декартовых размерностей насыщенности, полноты и чистоты цвета (уравнения 16.30–16.35):

$$a_C = C\cos(h) \quad (16.30)$$

$$b_C = C\sin(h) \quad (16.31)$$

$$a_M = M\cos(h) \quad (16.32)$$

$$b_M = M\sin(h) \quad (16.33)$$

$$a_s = s\cos(h) \quad (16.34)$$

$$b_s = s\sin(h) \quad (16.35)$$

16.12 ОБРАТНАЯ МОДЕЛЬ

В сфере цветовоспроизведения весьма важна возможность инверсии модели цветового восприятия, и CIECAM02 (в основном благодаря использованию простого линейного расчета смены хроматической адаптации) в этом смысле существенно лучше, нежели CIECAM97s. В техническом отчете CIE, посвященном CIECAM02 (CIE, 2004), даны детальная схема ее инверсии и ряд рабочих примеров.

Пошаговая процедура инверсии CIECAM02 (начиная с JCh) такова:

1. Вычисление t из C и J.
2. Вычисление e_t из h.
3. Вычисление A из A_W и J.

4. Вычисление a и b из t, e_t, h и A.

5. Вычисление R'_a, G'_a и B'_a из A, a и b.

6. Линеаризация данных для получения R', G' и B'.

7. Конверсия полученных значений в R_C, G_C и B_C путем линейного преобразования.

8. Обратный расчет хроматической адаптации для получения R, G и B, а затем X, Y, и Z.

16.13 РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Еще одной особенностью CIECAM02 является подробное пользовательское руководство, размещенное в техническом отчете CIE: наряду с рабочими примерами даны примеры необходимых предустановок (что полезно тем, кого интересует не только самоя концепция модели, но и практическое использование CIECAM02 в прямом и обратном направлениях). В таблице 16.3 приведены выдержки из упомянутого отчета, мы лишь добавим, что темному окружению приписывается практически нулевая яркость; тусклому — яркость меньшая, чем 20% от яркости белой точки сцены (или изображения); средним считается окружение, яркость которого больше или равна 20% от белой точки сцены (или изображения).

16.14 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФЕНОМЕНОВ

CIECAM02 в состоянии прогнозировать те же феномены восприятия, что и CIECAM97s, и включает в себя корреляты всех типичных атрибутов восприятия (относительных и абсолютных), лежащих в огромном диапазоне уровней яркости и вариантов адаптации. Аналогично своему предшественнику, CIECAM02 неприменима к ситуациям, при которых значим палочковый компонент зрения, или к ситуациям с экстремально высокими уровнями яркости, способными вызвать колбочковое ослепление.

Примеры вычислений по CIECAM02 даны в таблице 16.4.

16.15 ПОЧЕМУ НЕ ТОЛЬКО CIECAM02?

Если попытаться найти международно признанную модель цветового восприятия с относительно простой структурой, но работающую столь же хорошо (или даже лучше), как известные модели, то CIECAM02 — это безусловно оптимальный выбор (сегодня нет никаких научных оснований отдавать предпочтение, скажем, CIECAM97s, поскольку CIECAM02 проще по исполнению и практичнее в прикладном смысле).

В целом логическая иерархия моделей цветового восприятия начинается с CIELAB, но если вдруг она оказывается неадекватной задачам конкретной рабочей ситуации, то следующим логическим шагом должна быть комбинация CIELAB с наилучшей моделью хроматической адаптации (например, линейным расчетом смены хроматической адаптации CAT02).

Таблица 16.3 Примеры предустановок CIECAM02 при использовании ее в типичных ситуациях

Пример	Освещенность в lux (светимость в cd/m²)	Сцена или светимость белой точки устройства	L_A (cd/m²)	Стимул, принятый за белую точку	Окружение
Цвет поверхности, оцениваемый в просмотровой кабине	1000 (318.3)	318.30	63.66	Белая точка просмотровой кабины	Среднее
Самосветящийся дисплей в домашней обстановке	38 (12)	80	16	Между дисплеем и белой точкой окружения	Тусклое
Просмотр слайдов в темной комнате	0 (0)	150	30	Между белой точкой проектора и E-осветителем	Темное
Самосветящийся дисплей в офисе	500 (159.2)	80	16	Между белой точкой дисплея и офисным освещением	Среднее

Если потребуется дополнительная гибкость системы, то подойдут чуть более сложные модели, такие, как RLAB или LLAB[1] (при этом имеет смысл заменить оригинальный расчет смены адаптации на CAT02).

Если же нужна максимально развитая модель, то лучшим выбором явится CIECAM02 (в некоторых ситуациях детальный контроль условий просмотра, требуемый для обеспечения максимальной эффективности CIECAM02, невозможен, и приходится возвращаться к простым моделям, которые, тем не менее, могут оказаться вполне подходящими).

Наконец, если и CIECAM02 окажется неадекватной некоей ситуации (к примеру, когда необходим прогноз палочковых эффектов), то наилучшим выбором станет хантовская модель.

16.16 ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ

CIECAM02 — это плод развития моделей цветового восприятия в течение шести лет (то есть в период от момента создания CIECAM97s до 2003 года включительно).

Сразу после опубликования CIECAM97s стали поступать указания на недостатки модели и высказываться предложения по ее совершенствованию. Для претворения этих предложений в жизнь был сформирован новый комитет CIE. Сегодня в отношении CIECAM02 подобного не наблюдается и ясно также, что пройдет много более шести лет, прежде чем на свет появится новая версия мо-

[1] В оригинале допущена опечатка: RLAB записана дважды («<...>RLAB or RLAB<...>»). В переводе исправлено исходя из контекста предшествующих глав. — *Прим. пер.*

Таблица16.4 Примеры вычислений по CIECAM02

Величина	Пример 1	Пример 2	Пример 3	Пример 4
X	19.01	57.06	3.53	19.01
Y	20.00	43.06	6.56	20.00
Z	21.78	31.96	2.14	21.78
X_W	95.05	95.05	109.85	109.85
Y_W	100.00	100.00	100.00	100.00
Z_W	108.88	108.88	35.58	35.58
L_A	318.31	31.83	318.31	31.83
F	1.0	1.0	1.0	1.0
D	0.994	0.875	0.994	0.875
Y_b	20.0	20.0	20.0	20.0
N_c	1.0	1.0	1.0	1.0
F_L	1.17	0.54	1.17	0.54
N_{bb}, N_{cb}	1.0	1.0	1.0	1.0
h	219.0	19.6	177.1	248.9
H	278.1	399.6	220.4	305.8
H_C	78B 22G	100R	80G 20B	94B 6R
J	41.73	65.96	21.79	42.53
Q	195.37	152.67	141.17	122.83
s	2.36	52.25	58.79	60.22
C	0.10	48.57	46.94	51.92
M	0.11	41.67	48.80	44.54
a_C	−0.08	45.77	−46.89	−18.69
b_C	−0.07	16.26	2.43	−48.44
a_M	−0.08	39.27	−48.74	−16.03
b_M	−0.07	13.95	2.43	−41.56
a_s	−1.83	49.23	−58.72	−21.67
b_s	−1.49	17.49	2.93	−56.18

дели CIE. Одна из причин тому в следующем: модель прогнозирует визуальные данные в рамках исходной экспериментальной погрешности, и, следовательно, ожидать серьезных усовершенствований не приходится до тех пор, пока не будут получены более точные и достоверные экспериментальные величины (или же до тех пор, пока не будет получено радикально большее их количество, позволяющее улучшить среднестатистический результат). К тому же, какого-либо существенного прогресса в обозримом будущем ожидать не приходится из-за высокой стоимости и сложности визуальных экспериментов, а также из-за неизбежной вариабельности наблюдателей.

Сегодня ученые, работающие в сфере изучения цветового восприятия, идут по несколько иному пути: они обращаются к более сложным просмотровым ситуациям и к получению моделей, обладающих новыми возможностями, в частности прогнозирования пространственных и временны́х эффектов. Когда вышла в свет первая редакция нашей книги, подобные модели только начинали обсуждаться, но к моменту выхода второго издания многие из них уже были воплощены в жизнь. Общая концепция таких моделей (и один из примеров) даны в 20-й главе.

Вполне вероятно, что модели нынешние — это предтеча моделей будущего, но сегодня, скорее всего, именно CIECAM02 получит общее признание и будет широко применяться. Очень интересно, как сложится ее дальнейшая судьба.[1]

---

[1] Сегодня CIECAM02 задействована во внутренней структуре ведущих Color Management-приложений, в частности, Profile Maker 5.x.x компании GretagMacbeth. — *Прим. пер.*

17 ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

В главах с 10–16 мы рассмотрели ряд моделей цветового восприятия, в контексте некоторых визуальных феноменов, которые должны быть прогнозируемы этими моделями. Настало время задать себе вопрос: насколько хорошо модели цветового восприятия справляются со своей задачей? Ясно, что для исчерпывающего ответа необходимы количественные тесты, поскольку практика — критерий истинности любой теории. К сожалению, публикаций, посвященных внутреннему устройству моделей, несравнимо больше, чем отчетов об их практическом применении. На то есть ряд причин: первая — недостаток надежных и достоверных данных о цветовом восприятии наблюдателей; вторая — то, что до недавнего времени модели цветового восприятия развивались быстрее, чем выполнялись работы по оценке их исполнения (к счастью, сегодня ситуация начала меняться к лучшему).

Текущая глава дает краткий обзор некоторых экспериментальных работ по тестированию моделей цветового восприятия и сбору дополнительных данных для будущих испытаний. Проверка моделей цветового восприятия была и остается предметом активного научного исследования, и мы надеемся, что дополнительные тесты, а также новые версии прежних моделей будут публиковаться и далее.

17.1 КРАТКИЙ ОБЗОР

Создание моделей цветового восприятия того уровня организации, что представлены в главах 10–16, требует большого числа разнообразных экспериментальных материалов. Данные, на которых строились описанные нами модели, поступали к исследователям на протяжении долгой истории экспериментов со зрением, каждый из которых был нацелен на тот или иной специфический аспект цветового восприятия (описание экспериментов см. в гл. 6). Затем для одновременного прогнозирования определенного комплекта зрительных феноменов были созданы сами модели. Однако для того чтобы только построить модель (пусть даже весьма развитую) большого числа тестовых данных не требуется, более того — можно вообще обойтись без них.

Для объективного теста готовых моделей необходимо шкалирование атрибутов восприятия (субъективной яркости, светлоты, полноты цвета, насыщенности и цветового тона), чередующееся с их визуальной оценкой.

В свое время были выполнены испытания большого числа моделей восприятия, но, к сожалению, ни один из тестов не оказался удовлетворительным, и вопрос о том, какая же из моделей оптимальна для всех мыслимых ситуаций, по-прежнему остается открытым.

Проведенные тесты можно разделить на четыре общих класса:

1. Качественная оценка (по различным феноменам).
2. Оценка по согласованным цветовым стимулам.
3. Оценка путем количественных экспериментов.
4. Непосредственное психофизическое сравнение прогнозов, выполненных разными моделями.

Тест каждого класса вносит свой особый вклад в общую картину функциональной оценки моделей цветового восприятия, но ни один из них сам по себе не годится для решения вопроса о том, какая модель является лучшей.

В рамках технического комитета CIE действуют структуры, целиком ориентированные на тестирование моделей восприятия, и эти структуры испытывают модели по каждой из четырех описанных методик. Конечной целью тестов является решение вопроса о пригодности той или иной модели (или того или иного метода) к спецификации цветового восприятия.

17.2 КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА

Существует множество видов тестов, которые по тем или иным причинам можно считать качественными. Качественное испытание характеризует общее направление прогнозов, выполняемых моделью, но не обеспечивает числового сравнения разных моделей.

Качественные тесты включают в себя:

1. Вычисления, демонстрирующие то, что какой-либо феномен восприятия может быть спрогнозирован в принципе (к примеру, рост полноты цвета по мере роста фотометрической яркости).
2. Предсказание общих тенденций на основе статистических данных.
3. Сравнение с цветовыми координатными системами.
4. Сокращенные визуальные эксперименты, оценивающие отдельные функциональные элементы модели.

В 1988 г. научная команда Наятани опубликовала один из первых примеров качественной оценки своей модели. Было задействовано два набора данных: первый прогнозировал цветовое восприятие манселловских образцов под CIE A-осветителем, второй на базе эксперимента Мори и Фучида (1982) оценивал цветопередачу.

Анализ прогноза восприятия манселловских образцов продемонстрировал, что модель Наятани прогнозирует эффект Хельсона — Джадда при A-осветителе, в то время как фонкризовский расчет при таких условиях его отрицает. Наятани с коллегами провел небольшой визуальный эксперимент, в котором трое испытуемых (включая авторов модели) наблюдали слабо выраженный эффект Хельсона — Джадда на образцах, рассматривавшихся при свете ламп накаливания. Плюс к тому, исследователи изучили некоторые тонкости цветоразличения, которые лучше коррелировали с предикторами их модели, нежели с результатами фонкризовского расчета. Ученые показали также, что модель Наятани дает вполне адекватные прогнозы согласованных цветовых стимулов Мори и Фучида, однако сравнения с другими моделями не провели.

На примере работы Наятани мы видим, что для качественной оценки моделей восприятия активно применяются цветовые координатные системы (например, манселловская и NCS, см. гл. 5): очень часто при создании модели восприятия для оценки ее перцепционной равномерности авторы модели вычерчивают контуры манселловских цветового тона, светлоты и насыщенности. Альтернативно можно исследовать контуры цветового тона, белизны/черноты и хроматичности системы NCS, полагая при этом, что цветовые координатные системы построены на высокоточных шкалах восприятия. Таким образом, любая модель должна быть способна выдавать предикторы атрибутов восприятия, которые соответствуют контурам постоянных манселловских цветового тона, светлоты и насыщенности.

Многие авторы к отчету об устройстве своих моделей прилагают манселловские (или NCS) контуры, к примеру: Наятани и колл. (1987, 1990), Гут (1991), Хант (1995), Фершильд и Бернс (1993). Фактически, последний пересмотр модели Наятани (1995) был выполнен для коррекции недочетов в контурах манселловских цветового тона и насыщенности по разным уровням светлоты; Сэйм и Вальберг (1986) дали развернутый анализ представления манселловской системы в пространстве CIELAB и предложили альтернативные уравнения, подобные тем, что мы обнаруживаем в хантовской модели; Вибль и Фершильд (2000) выполнили качественный анализ представления манселловской системы разными моделями, что в итоге помогло доработать CIECAM02.

В 1990 г. Наятани опубликовал любопытное сравнение собственной модели с моделью Ханта, содержавшее манселловские контуры, вычерченные в цветовых пространствах обеих моделей, а также поточные диаграммы сравнения вычислений по каждой из них. Однако поскольку после публикации обе модели были радикально пересмотрены, эта весьма интересная работа на данном этапе имеет скорее историческое значение.

Манселловские и NCS-контуры действительно дают нам некоторое представление о качестве исполнения и свойствах моделей Наятани и Ханта, однако Наятани не публиковал результатов количественного сравнения контуров с цветовыми координатными системами (при таком сравнении контуры постоянного цветового тона должны выглядеть как прямые радиальные линии, а контуры постоянной насыщенности — как концентрические круги с постоянным шагом).

С помощью количественного анализа можно было бы определить, насколько модели Ханта и Наятани близки к желаемому качеству (Вибль и Фершильд, 2000), однако такой анализ проводят крайне редко, и, вероятно, потому, что его потенциальный результат редко бывает утешительным. С другой стороны, до сих пор точно не определена перцепционная достоверность цветовых координатных систем, что создает сложности в понимании того, какими, собственно, должны быть хорошие прогнозы.

Результаты количественного анализа моделей Ханта и Наятани свидетельствуют о том, что обе модели выполнены одинаково хорошо. Данный вывод подтверждается анализом контуров постоянного цветового тона, выполненным Хангом и Бернсом (1995), при котором проводилась масштабная визуаль-

ная оценка. Количественный анализ Ханга и Бернса показал помимо прочего то, что постоянство контуров цветового тона всеми без исключения моделями прогнозируется нечетко и что не существует одной лучшей модели.

В 2000 г. Морони установил, что большинство недавно разработанных цветовых пространств, таких, как IPT (см. гл. 20), CIECAM97s и CIECAM02, дают наилучшие предикторы постоянного цветового тона.

В 1991 г. Хант дал блестящий пример качественной оценки собственной модели: ученый продемонстрировал, как его модель прогнозирует пороги колбочкового и палочкового насыщений, эффекты Стивенса и Ханта, а также эффект влияния относительной яркости окружения на контраст изображения и т.п. В частности, Хант дал весьма эффектный пример того, как его модель прогнозирует восприятие предметов на отфильтрованном слайде: в классическом варианте хантовского опыта (Хант, 1995) на некий желтый объект слайд-изображения накладывался голубой фильтр, в результате чего закрытый фильтром предмет начинал восприниматься зеленым. Однако когда этим же фильтром закрывался весь слайд, объект (за счет хроматической адаптации) почти полностью восстанавливал оригинальный желтый цвет.

Данный эффект в первую очередь относится к проекционному показу слайдов, но может возникнуть и на отражающих отпечатках (Хант, 1995). Хант (1991) весьма наглядно продемонстрировал способность своей модели прогнозировать данный эффект, но стоит отметить, что на это способны и такие простые модели, как CIELAB и RLAB (Фершильд и Бернс, 1993).

Хантовский опыт проимитирован рис. 17.1, где фильтром прикрыт банан.

* * *

Возможно, наиболее ценным результатом качественного анализа моделей цветового восприятия является список прогнозируемых ими эффектов (табл. 17.1), однако важно помнить, что такой список не дает информации о том, насколько точно конкретная модель прогнозирует тот или иной феномен восприятия. Нехватка информации о точности прогнозов — это, пожалуй, самое серьезное ограничение качественных методов оценки и в дополнение к ним всегда требуются количественные методы, описанные в следующих разделах текущей главы.

17.3 ОЦЕНКА ПО СОГЛАСОВАННЫМ ЦВЕТОВЫМ СТИМУЛАМ

В 8-й главе мы говорили о согласованных цветовых стимулах в контексте изучения хроматической адаптации, но данные по согласованным стимулам могут быть собраны и проанализированы также в контексте и других феноменов цветового восприятия.

Напомним, что согласованные цветовые стимулы определены как два набора трехстимульных значений, описывающих стимулы, которые соответствуют друг другу по цветовому восприятию в двух разных, несопоставимых друг с другом условиях просмотра. Вспомним также, что коль скоро некое изменение в условиях просмотра оказывает влияние на цветовое восприятие, то трехсти-



Рис. 17.1 Хроматическая адаптация: (a) — оригинал; (b) — имитация голубого фильтра, положенного поверх банана, в результате которой банан начинает восприниматься зеленым; (c) — имитация того же голубого фильтра, положенного поверх всего изображения. Обратите внимание на то, что на с-изображении банан вновь воспринимается желтоватым, хотя физически он идентичен банану b-изображения.
Оригинальное изображение — фрагмент набора ISO SCID.

Таблица 17.1 Феномены цветового восприятия, прогнозируемые различными моделями. Галочки указывают на то, что модель способна к непосредственному прогнозированию феномена

	ATD	CIELAB	LLAB	RLAB	Наятани	Хант	CIECAM
Светлота		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Субъективная яркость	✓				✓	✓	✓
Насыщенность		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Чистота цвета	✓		✓	✓	✓	✓	✓
Полнота цвета			✓		✓	✓	✓
Угол цветового тона	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Цветовой тон			✓	✓	✓	✓	✓
Эффект Хельсона — Джадда					✓	✓	
Эффект Стивенса					✓	✓	✓
Эффект Ханта	✓		✓		✓	✓	✓
Эффект Гельмгольца — Кольрауша	✓				✓	✓	
Данные Бартлесона — Бренемана			✓	✓		✓	✓
Когнитивное обесцвечивание осветителя			✓	✓		✓	✓
Неполнота адаптации				✓		✓	✓
Цветовые отличия		✓	✓	✓		✓	?
Прочее	✓				✓	✓	

мульные значения согласованных стимулов будут в этом случае отличаться друг от друга по абсолютной величине.

Для тестирования моделей цветового восприятия трехстимульные значения по первым условиям просмотра пересчитываются в соответствующие трехстимульные значения согласованных цветовых стимулов по вторым условиям. Дабы определить, насколько точно работает та или иная модель, полученный прогноз (то есть расчетные трехстимульные значения) поверяется стимулами, согласованными визуально, а результаты, как правило, анализируются по какой-либо равномерной шкале цветностей (например, $u'v'$) или в каком-либо равномерном цветовом пространстве (например, CIELAB) и оцениваются по среднеквадратическим отклонениям между прогнозируемыми и наблюдаемыми цветами.

Вспомним, что Наятани (1990) указывает на существенную разницу между соответствиями по светлоте/насыщенности и субъективной яркости/полноте цвета. Полная модель цветового восприятия может использоваться для прогноза соответствий обеих категорий, но напомним, что эти категории могут отли-

чаться друг от друга по результатам согласования (если между условиями просмотра имеется расхождение по уровням яркости).

Один из самых масштабных серийных экспериментов по согласованию цветовых стимулов при анализе моделей цветового восприятия был проведен Японской Цветовой Научной Ассоциацией (Color Science Association of Japan — CSAJ) и в 1991 г. подытожен Мори:

1. Эксперимент по смене хроматической адаптации при переходе от D65-имитатора к А-имитатору на уровне освещенности 1000 lux. Оценка проводилась 104 наблюдателями по 87 образцам с использованием модифицированного гаплоскопического метода.

2. Эксперимент по сбору данных об измерении хантовского эффекта с использованием пяти цветных образцов, оцениваемых 40 наблюдателями при D65-имитаторе при пяти различных уровнях освещенности.

3. Эксперимент по сбору данных об измерении эффекта Стивенса с использованием пяти нейтральных образцов, рассматриваемых 31 наблюдателем при пяти различных уровнях освещенности.

4. Эксперимент по изучению эффекта Хельсона — Джадда для ахроматических образцов, рассматриваемых под высокохроматичным флуоресцентным светом.

На сегодня эксперименты CSAJ — это одно из самых масштабных исследований цветового восприятия, задействовавшее наибольшее число наблюдателей.

К сожалению, Мори (1991) доложил только о качественном анализе экспериментальных результатов, продемонстрировав графики прогнозированных и визуально-согласованных цветовых стимулов при оценке трех моделей смены хроматической адаптации: моделей Наятани, фон Криза и Ханта.

Мори пришел к выводу, что модель Наятани дает наилучшие прогнозы, однако дальнейшее исследование графиков показало, что хантовская модель смены адаптации работает отнюдь не хуже, а фонкризовский расчет — даже лучше обеих моделей. Мори установил, что модель Наятани хорошо прогнозирует эффект Ханта, но при этом не сравнил свои данные прогнозами самоей хантовской модели.

Подобный анализ был выполнен по эффектам Стивенса и Хельсона — Джадда, его результаты показали, что модель Наятани выдала явный гиперпрогноз по эффекту Стивенса, который на деле оказался весьма мал. То же произошло и в отношении эффекта Хельсона — Джадда. Количественный анализ данных Мори (будет описан позже) был выполнен 34-м техническим комитетом CIE (CIE TC1-34).

В 1987 г. Бренеман собрал внушительную коллекцию стимулов, согласованных по изменениям в хроматической адаптации и уровне фотометрической яркости, в дальнейшем его данные использовались для оценки различных моделей смены хроматической адаптации и моделей цветового восприятия (Фершильд, 1991). Модели сравнивались на базе $u'v'$-диаграммы цветностей CIE 1976 по среднеквадратическим отклонениям их предикторов от визуальных результатов. Наилучший прогноз хроматической адаптации выдали хантовская и RLAB-модели, второе и третье места достались Наятани и фон Кризу соответст-

венно. CIELAB и CIELUV оказались худшими. Данные Бренемана указали на то, что реальный хантовский эффект слабее, чем его прогнозы, выданные моделями Ханта и Наятани (прочими моделями он вообще не был предсказан). Среднеквадратические отклонения по обеим моделям убедительно показали, что отсутствие прогноза по хантовскому эффекту обладает примерно той же прогностической точностью, что и гиперпрогноз, выданный моделями Ханта и Наятани.

В 1991 г. Луо конвертировал ряд данных по числовому шкалированию цветового восприятия (описаны в разделе 17.4) в наборы согласованных стимулов по различным изменениям в условиях просмотра, а затем, в зависимости от направлений смены хроматической адаптации, разложил их на три группы:

— переход от CIE-осветителя D65 к D50;

— переход от D65 к A;

— переход от D65 к флуоресцентному белому.

Далее, на базе пространства CIELAB, по традиционным и среднеквадратическим отклонениям ученый оценил шесть вариантов расчета смены адаптации. Результаты показали, что брэдфордская модель, положенная в основу LLAB и CIECAM97s, является лучшей. Модели Ханта, Наятани и CIELAB работали сходно или немногим хуже (дополнительные сведения можно найти у Куо и колл. [1995]).

В 1997 г. Браун и Фершильд провели эксперимент, в котором наблюдателей просили уравнять изображение на экране CRT-монитора, при разных белых точках, с твердой копией этого же изображения при постоянной белой точке. Пять наблюдателей согласовывали по два разносюжетных изображения, и каждая пара имела по два варианта белых точек: 3000 K у экрана и 6500 K у отпечатка, 9300 K у экрана и 6500 K у отпечатка. Данные собирались по отдельным участкам изображения, дабы избежать влияния на результат его больших областей. Согласованные стимулы были проанализированы в пространстве CIELAB с помощью средних и среднеквадратических отклонений. Результаты показали, что лучше всего прогнозируют визуально-согласованные цветовые стимулы RLAB, LLAB и CIELAB, а модели Ханта и Наятани работают хуже.

* * *

Мы видим, что исследования, описанные выше, иллюстрируют вариабельность экспериментальных результатов, и, к сожалению, их анализ не дает ясного представления о качестве протестированных моделей. Частично это объясняется тем, что с течением времени старые модели были переработаны, частично — тем, что появились новые модели.

17.4 ОЦЕНКА ПУТЕМ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В экспериментах по количественной оценке восприятия стимулов наблюдатели непосредственно присваивают числовое значение величине своего ощущения. Эффективность данной экспериментальной методики в свое время была в центре внимания классической работы Стивенса (1961), в которой автор показал, что эксперименты по количественной оценке позволяют напрямую из-

мерять величину светлоты, насыщенности и цветового тона того или иного стимула в тех или иных условиях просмотра. Сегодня данные экспериментов по количественной оценке восприятия стимулов используются и для тестирования существующих, и для создания новых моделей цветового восприятия.

Один из самых масштабных экспериментов по количественному шкалированию цветового восприятия был выполнен в научном центре Лафборского университета (Loughborough University of Technology Computer Human Interface — LUTCHI), о чем докладывает Луо в серии статей от 1991, 1993, 1995 гг.:[1]

1. Луо и колл. (1991a)

«Шесть (в ряде случаев — семь) наблюдателей шкалировали светлоту, полноту цвета и цветовой тон 61–105 стимулов, представленных в 21 комбинации различных параметров условий просмотра (последние варьировали по белой точке, носителю, уровню фотометрической яркости и фону). Результаты показали, что наибольшее влияние на цветовое восприятие оказывают фон и белая точка. Влияние прочих факторов не столь очевидно, что, вероятно, обусловлено низкой достоверностью количественных экспериментов. Недостоверность данных выражена коэффициентами вариабельности (*CV*), о которых можно говорить как о среднеквадратическом отклонении в процентах. Общие *CV*-значения по межнаблюдательской вариабельности равны: 13 по светлоте, 18 по полноте цвета и 9 по цветовому тону. В первой части экспериментов модели цветового восприятия не оценивались.

Одной из проблем в исследовании LUTCHI явился странный подбор шкалируемых атрибутов восприятия (светлота, полнота цвета и цветовой тон), но авторы исследования заявили, что полнота цвета, по их мнению, физиологически важнее насыщенности. Однако для шкалирования в связке со светлотой больше подходит насыщенность, поскольку это тот атрибут, который наблюдатели обычно соотносят с объектами и который не требует от испытуемых предварительного изучения его определения. При постоянном уровне яркости, вероятно, легко понять, что насыщенность и полнота цвета связаны между собой через простой шкалирующий коэффициент, но нет никаких оснований рассчитывать на то, что при изменении яркости отношения между насыщенностью и полнотой цвета будут меняться линейно».

2. Луо и колл. (1991b)

«На втором этапе исследования результаты первой части экспериментов были использованы для оценки различных моделей хроматической адаптации и моделей восприятия (анализ проводился путем расчета *CV*-значений между визуальными данными и предикторами моделей). Резюме таково: лучшей по светлоте оказалась хантовская модель, второе и третье места соответственно за CIELAB и моделью Наятани.

С полнотой цвета все модели справились плохо, но хантовская модель (точнее, ее версия, подстроенная под текущие данные) оказалась чуть лучше остальных.

По цветовому тону хантовская модель оказалась существенно лучше, чем модель Наятани. Прочие модели по цветовому тону не оценивались.

---

1 Результаты этого эксперимента впоследствии подытожены Хантом и Луо (1994).

Результаты анализа были использованы для формулировки последних версий хантовской модели.

3. Луо и колл. (1993a)

«На третьей стадии исследования для проверки результатов предыдущего этапа были собраны дополнительные сведения, расширяющие диапазон условий просмотра и включающие в себя шкалирование субъективной яркости. Полученные данные в дальнейшем были задействованы в тестировании моделей.

Для сбора новых сведений (по D50-имитатору при шести различных уровнях фотометрической яркости) в шкалировании приняли участие четыре наблюдателя. Анализ результатов показал, что хантовская модель в целом лучше остальных.

По шкалированию светлоты столь же хороша оказалась CIELAB (при условии, что проигнорированы низкие уровни фотометрической яркости).

По цветовому тону и полноте цвета хантовская модель в целом лучше, чем модель Наятани».

4. Луо и колл. (1993b)

«На четвертом этапе исследования экспериментальный метод был расширен до оценки прозрачных носителей (проекционный показ слайдов и просмотр слайдов в световой кабине). В экспериментах приняли участие от 5 до 8 человек; светлота, полнота цвета и цветовой тон шкалировались в общей сложности по 16 различным условиям просмотра.

Было выявлено, что модель Ханта работает ощутимо хуже, чем на предыдущих этапах, в результате чего был принят ряд поправок к ее последней версии. CIELAB по прозрачным носителям сработала очень хорошо, и заметно лучше, чем немодифицированная хантовская модель. Модель Наятани оказалась ощутимо хуже, чем CIELAB и немодифицированная модель Ханта. Хантовская модель, подправленная с учетом экспериментальных данных, оказалась лучшей по всем параметрам».

5. Луо и колл. (1995)

«На пятом этапе эксперимента исследовался феномен симультанного контраста: пять наблюдателей шкалировали светлоту, полноту цвета и цветовой тон образцов, представленных на экране CRT-монитора, при том, что проксимальное поле этих образцов менялось по определенной схеме. Результаты показали, что все три размерности цветового восприятия, как и ожидалось, подвержены индукции. Оценка хантовской модели (единственной модели, способной к непосредственному учету симультанного контраста) показала ее несостоятельность по данному направлению и необходимость дальнейшей модификации».

В 1994 г. Хант и Луо подытожили результаты первых четырех экспериментов LUTCHI и сделали выводы о путях совершенствования хантовской модели. В целом эксперименты показали, что хантовская модель прогнозирует цветовой тон с *CV*-показателем 7–8 при вариабельности наблюдателей *CV* = 8. По светлоте модель дала *CV* = 10–14 при вариабельности наблюдателей *CV* = 13. По полноте цвета *CV* держалась в районе 18 при вариабельности наблюдателей *CV* = 17. Исследователи пришли к заключению, что хантовская модель способ-

на прогнозировать экспериментальные данные с эффективностью одного усредненного наблюдателя.

Итак, мы видим, что был получен безусловно внушительный и хороший результат.

* * *

Данные экспериментов LUTCHI оказали существенное влияние на работу CIE TC1-34 по оценке новых моделей восприятия и созданию CIECAM97s (см. раздел 17.6 текущей главы). К сожалению, точные сведения долгое время не публиковались, поскольку считались собственностью спонсоров, но в итоге они все-таки были обнародованы и использованы при создании CIECAM02.

17.5 НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ИСПЫТАНИЕ МОДЕЛЕЙ

Точность экспериментов по количественной оценке стимулов можно повысить за счет использования усовершенствованных психофизических методов. Один из таких методов задействует эксперименты по парному сравнению, при которых наблюдатели, просматривая по два стимула одновременно, выбирают лучшую пару. Для получения интервальных шкал (и выявления их естественной погрешности) результаты анализируются по закону сравнительных оценок (закон Тарстона; см. гл. 2. — *Прим. пер.*).

Оценку моделей цветового восприятия начинают с получения комплекта трехстимульных значений оригинальных стимулов (или изображения) в первых условиях просмотра, а затем рассчитывают согласованные стимулы (или изображения) по вторым условиям. Процедуру проводят с каждой из исследуемых моделей, после чего наблюдатели из всех пар стимулов выбирают ту, которая является наилучшей репродукцией оригинала в новых условиях просмотра. На выходе эксперимента исследователи получают интервальные шкалы, по которым судят об относительном качестве каждой модели.

Серьезным недостатком данного подхода является то, что результаты экспериментов не могут быть использованы для создания новых моделей.

В Манселловской научной лаборатории по цвету Рочестерского технологического института была проведена развернутая серия аналогичных экспериментов, результаты которых подытожены Фершильдом (1996) и представлены ниже.

В 1993 г. Фершильд и Бернс провели серию упрощенных экспериментов, дабы продемонстрировать пользу от применения моделей цветового восприятия в репродуцировании изображений на разных носителях. Используя весьма простую методику последовательного бинокулярного сравнения, исследователи проанализировали зрительный переход от отпечатков с разными фонами, рассматриваемых в свете A- и D50-имитаторов, к изображению на экране CRT-дисплея с белой точкой на D65. В эксперименте было задействовано 14 наблюдателей и шесть разносюжетных изображений. Сравнение проводилось в трех вариантах:

— прямое CIE *XYZ*-репродуцирование (то есть, без расчета смены адаптации);

— CIELAB-репродуцирование;

— RLAB-репродуцирование.

Результаты показали, что RLAB-репродуцирование наблюдатели выбирают в качестве лучшего в 70% случаев, CIELAB — в 30% и XYZ — в 0%. Таким образом, мы видим, что при смене условий просмотра расчет смены адаптации действительно необходим. Кроме того, видно, что RLAB явно выигрывает у CIELAB.

В том же, 1993, году Ким исследовал восемь расчетов смены адаптации, выполненных для оттисков, оцениваемых в разных условиях просмотра: оригинальные отпечатки рассматривались в свете CIE A-имитатора, а их репродукции, разными способами рассчитанные по трем различным уровням фотометрической яркости, — при CIE D65-имитаторе. Плюс к тому был выполнен эксперимент по парному сравнению, в котором к 30 наблюдателям была применена техника т.н. последовательного гансфельдовского гаплоскопического просмотра и в результате которого по закону сравнительных оценок были получены интервальные шкалы (Фершильд, Пиротта и Ким, 1994).

Экспериментальные данные показали, что модели Ханта, RLAB, CIELAB и фон Криза работают примерно одинаково и существенно лучше, чем другие модели. Модель Наятани отработала хуже, чем все вышеперечисленные. Три оставшиеся модели (CIELUV, LABHNU2 и модель Кима) работали так плохо, что были исключены из дальнейших экспериментов.

Модель Наятани оказалась слаба тем, что прогнозировала возникновение эффекта Хельсона — Джадда, в результате чего света репродукции желтили, а тени — синили (хотя эффект Хельсона — Джадда в отношении сложных стимулов вообще не наблюдается при A-имитаторе). CIELUV, LABHNU2 и модель Кима оказались неподходящими из-за низкого качества встроенной в них схемы расчета смены хроматической адаптации.

В 1995 г. Пиротта и Фершильд выполнили аналогичный эксперимент, но с использованием простых стимулов, расположенных на сером фоне (то есть находящихся вне контекста изображений). На первой стадии исследования проводилось вычислительное сравнение различных моделей, дабы найти стимулы и условия просмотра, при которых визуальные эксперименты выявят наибольшее отличие между моделями.

Обратимся к некоторым результатам этого эксперимента: на рис. 17.2 показаны CIELAB-координаты согласованных цветовых стимулов при CIE A-осветителе и освещенности 1000 lux для трех нейтральных манселловских образцов со светлотами 3, 5 и 7, рассматриваемых под CIE D65-осветителем при освещенности 1000 и 10000 lux. Точки «F» демонстрируют неполноту адаптации, спрогнозированную фершильдовской моделью хроматической адаптации, действующей в RLAB (Фершильд, 1991); точки «N» демонстрируют прогноз эффектов Хельсона — Джадда и Стивенса, выполненный моделью Наятани; точки «H» демонстрируют прогноз эффекта Стивенса при изменении уровня фотометрической яркости, выполненный моделью Ханта. На том же рисун-

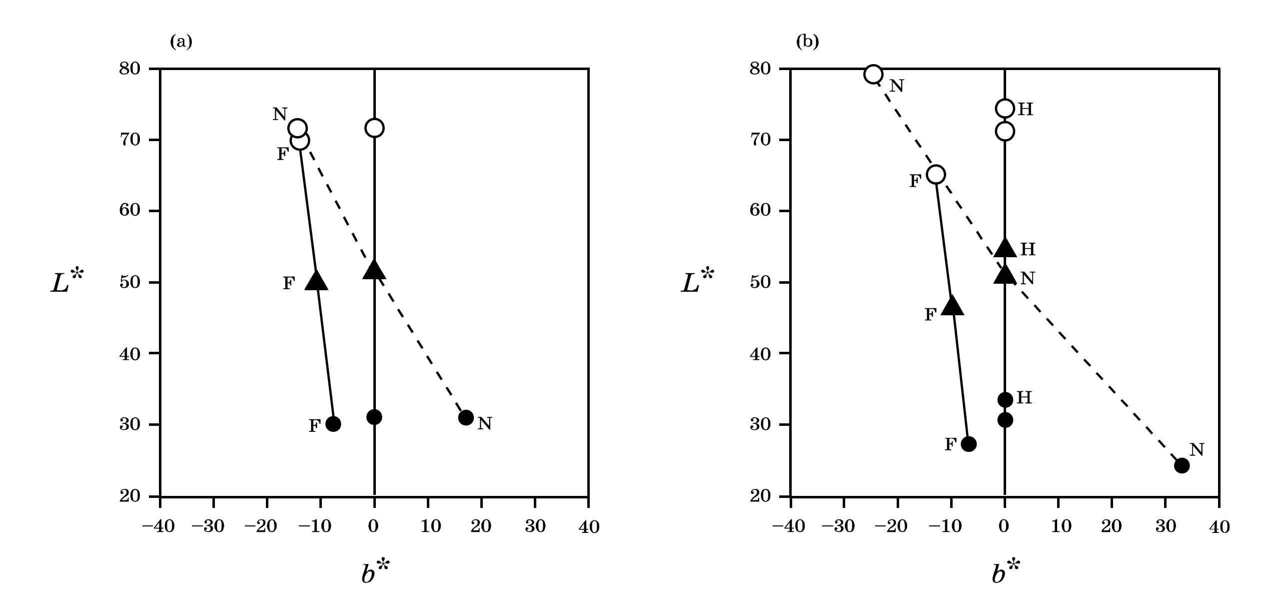


Рис. 17.2 Отличия между предикторами различных моделей цветового вопрития, представленные на L^*-b^*-плоскости пространства CIELAB: (a) — при 1000 lux; (b) — при 10000 lux .

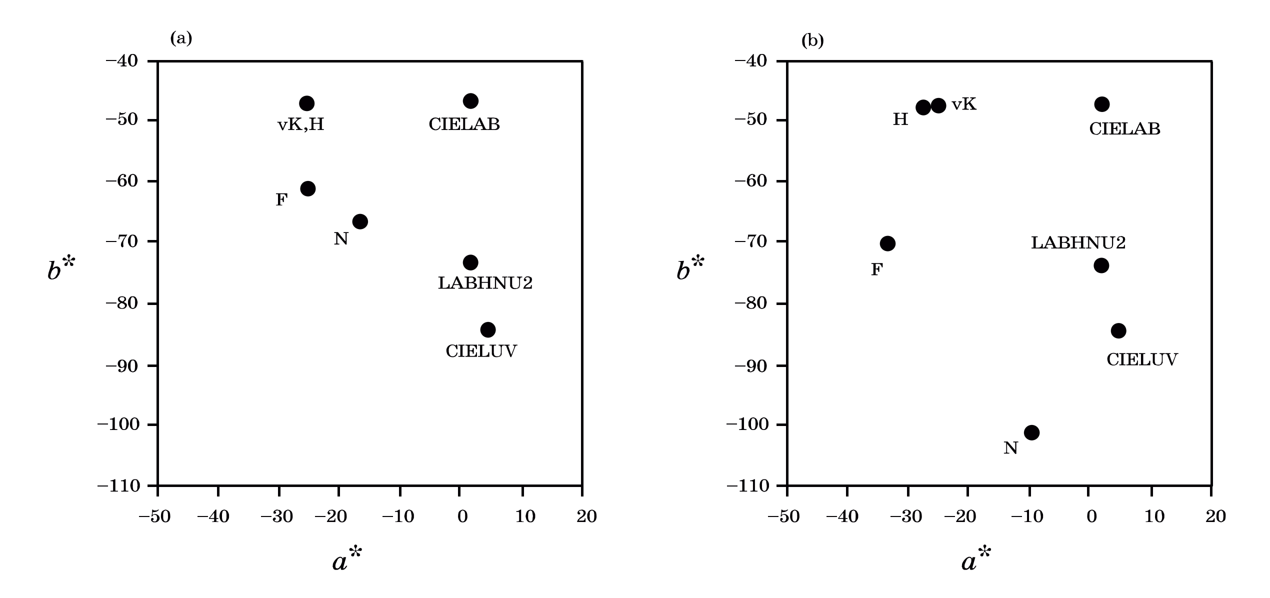


Рис. 17.3 Отличия между предикторами различных моделей цветового вопрития, представленные на a^*-b^*-плоскости пространства CIELAB: (a) — манселловский образец 5PB 5/12 при 1000 lux; (b) — он же при 10000 lux .

ке показан гиперпрогноз эффекта Хельсона — Джадда при A-осветителе, выполненный моделью Наятани.

На рис. 17.3 показаны предикторы согласованных стимулов для манселловского образца 5PB 5/12 при той же схеме изменений в условиях просмотра. Стоит обратить внимание на серьезные отличия в прогнозах, выполненных разными моделями (шкалы на графиках захватывают по 50 единиц CIELAB).

В описанном эксперименте, который был основан на технике парного срав-

нения, были задействованы 26 наблюдателей, 10 цветовых стимулов и переход от условий просмотра при A-имитаторе с яркостью 76 cd/m^2 к D65-имитатору с яркостью 763 cd/m^2.

Результаты эксперимента показали, что хантовская модель является лучшей. Фонкризовская модель, CIELAB и модель Наятани работали примерно одинаково, но все же не так хорошо, как модель Ханта. CIELUV и модель Фершильда (1991) оказались существенно хуже, что в итоге привело к пересмотру модели смены адаптации, интегрированной в RLAB (Фершильд, 1996).

В 1996 г. Браун с коллегами исследовали методики визуальных экспериментов и качество моделей цветового восприятия при смене носителя изображений и условий просмотра: уравнивались изображения на экране CRT-монитора, отстроенного на D65 по белой точке, с отпечатками, рассматриваемыми в свете CIE D50- и CIE A-имитаторов. В эксперименте приняло участие 15 наблюдателей, использовалось 5 разносюжетных изображений и было опробовано 5 методик визуальной оценки. Исследователи пришли к выводу, что методика последовательного бинокулярного сравнения (с 60-секундным периодом адаптации) дает самые надежные результаты. Любопытно, что данные широко применяемой методики одновременного бинокулярного сравнения оказались совершенно недостоверны.

Результаты эксперимента выявили серьезные отличия в качестве исследованных моделей; в порядке убывания качества они расположились следующим образом: RLAB, CIELAB, фонкризовская модель, модель Ханта и модель Наятани.

В 1996 г. Фершильд с коллегами провели аналогичный эксперимент по визуальному уравниванию изображений на экране CRT-монитора со слайд-проекцией этих изображений. По белой точке монитор был отстроен на D65 и D93 при яркости 60 cd/m^2 и при тусклом окружении. Экранная проекция изображений велась в темном окружении при 3900 K по белой точке и яркости 109 cd/m^2. Через эксперимент по трем разносюжетным изображениям прошли 15 наблюдателей. Результат: RLAB-модель оказалась лучшей, CIELAB и фонкризовская модель поделили второе место, а на третьем месте оказалась модель Ханта. Модель Наятани была исключена из финальных экспериментов, поскольку из-за гиперпрогноза по эффекту Хельсона — Джадда (а также по причине недостаточной выборки изображений) давала наихудшие репродукции.

В 1997 г. Браун и Фершильд расширили эксперимент по получению согласованных стимулов путем включения результатов опыта по уравниванию изображений в эксперимент по парному сравнению, проводимый с иными моделями восприятия. Для данного исследования были отобраны предикторы, выданные разными моделями и столь же удачные, что и изображения, уравненные наблюдателями. В уравнивании изображений приняли участие пять наблюдателей и еще 32 испытуемых участвовали в эксперименте по парному сравнению. Результаты показали, что RLAB-модель так же хорошо обеспечивает соответствие между изображениями, как если бы их уравнивали сами наблюдатели или же как если бы оно выполнялось с помощью т.н. статистических моделей.

CIELAB, фонкризовская модель и модель Ханта отработали много хуже, чем RLAB.

В 1996 г. Ли и Луо представили результаты экспериментов по парному сравнению изображений на экране CRT-мониторов с оттисками. В эксперименте приняло участие 18 наблюдателей. Исследователи проработали пять различных вариантов цветности белой точки при ее постоянной фотометрической яркости, и результаты показали, что CIELUV-модель является худшей из исследованных. Прочие модели в целом отработали примерно одинаково, но LLAB оказалась чуть более подходящей для ситуации перехода от A-осветителя к D65.

* * *

В лабораториях разных стран ставилось множество подобных экспериментов, многие из которых еще продолжаются. Данные тех исследований, что были описаны выше, и тех, что еще не закончены, активно используются различными комитетами CIE для создания, тестирования и редакции моделей цветового восприятия. С учетом результатов вышеперечисленных опытов были построены CIE-модели, которые на сегодня являются одними из самых лучших, если не самыми лучшими.

17.6 ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ CIE

Весьма трудно дать исчерпывающий анализ результатов всех вышеописанных экспериментов и вынести заключение о том, какая из моделей цветового восприятия на сегодня является лучшей и какую следует применять в том или ином конкретном случае. Процесс совершенствования моделей идет непрерывно, появляются все новые и новые экспериментальные данные, и сделать однозначный вывод (тем более по одной-единственной книге), разумеется, невозможно. По тем же причинам нет и международной договоренности о единой модели, рекомендуемой для всех возможных ситуаций, поэтому отметим только, что сегодня CIE активно занимается означенной проблемой, действуя через свои технические комитеты и информационные подкомитеты (о чем далее и пойдет речь).

TC1-34 «Тестирование моделей цветового восприятия»

Технический комитет CIE 1-34 «Тестирование моделей цветового восприятия» был создан с целью оценки качества различных моделей, предназначенных для прогнозирования цветового восприятия объектных стимулов[1]. Комитет опубликовал руководство, координирующее исследования по тестированию моделей цветового восприятия (Фершильд, 1995), где (с явным намерением стимулировать исследователей на дальнейшие шаги в этой сфере) изложен план необходимых работ. Плюс к тому, TC1-34 собрал и обобщил данные по результатам различных экспериментов, а также выполнил дополнительные тес-

[1] Под «объектными цветовыми стимулами» здесь и далее автор подразумевает стимулы, полученные за счет отражения света от различных поверхностей. — *Прим. пер.*

ты нескольких моделей. Однако отчет о проделанной работе так и не был опубликован из-за разногласий между комитетами CIE по вопросам интерпретации полученных данных. В итоге комитет поставил задачу разработки CIE-модели цветового восприятия, решением которой стали создание и публикация CIECAM97s (см. гл. 15 и CIE, 1998).

Теперь перейдем к подведению итогов дополнительного анализа ранее обсуждавшихся экспериментов CSAJ, LUTCHI и RIT (Рочестерский технологический институт).

Комитет проанализировал данные CSAJ, рассчитав в CIELAB-пространстве среднеквадратическое отклонение по расчету смены хроматической адаптации, прогнозу эффектов Стивенса и Ханта.

По смене хроматической адаптации: модель Ханта, RLAB и CIELAB оказались лучшими и весьма сходными друг с другом по результатам. Далее, в порядке убывания качества работы, следуют модель Наятани, LABHNU и CIELUV.

По прогнозу эффекта Стивенса: лучшей оказалась хантовская модель, худшей — модель Наятани (т.к. выдала гиперпрогноз по данному эффекту); RLAB, CIELAB, LABHNU и CIELUV не оценивались, поскольку данный эффект не прогнозируют.

По прогнозу эффекта Ханта: лучшей явилась хантовская модель, второй оказалась модель Наятани, а RLAB, CIELAB, LABHNU и CIELUV не оценивались, поскольку данный эффект не прогнозируют.

Дополнительное исследование данных LUTCHI, выполненное TC1-34, показало, что хантовская модель оказалась лучшей, а за ней, в порядке убывания качества, следуют RLAB, CIELAB и модель Наятани.

В резюме, посвященном непосредственному тестированию моделей цветового восприятия (проведенному на базе RIT), комитет указал на то, что точность прогнозов зависит от того, с чем работают модели: с изображениями или с простыми стимулами.

По изображениям: хантовская модель, CIELAB и RLAB оказались лучшими и в целом сходными по результатам; второе место поделили модель Наятани и LABHNU; худшей оказалась CIELUV.

По простым стимулам: хантовская модель — лучшая; CIELUV — худшая; остальные примерно посредине.

В общем проанализированные комитетом модели в зависимости от качества расположились в следующем порядке: модель Ханта, RLAB, CIELAB, модель Наятани, LABHNU и CIELUV. Полный анализ LLAB модели не был завершен, но, по данным LUTCHI, модель оказалась сильнее, чем хантовская, и вполне вероятно, что сходный результат был бы получен по данным других исследований.

CIE TC1-34 пришел к заключению, что ни одну из опубликованных моделей не может рекомендовать к общему употреблению. Тому были разные причины, но одна из главных состоит в том, что модели все еще продолжают развиваться и для однозначного и строгого заключения необходим ряд дополнительных тестов.

Итогом работы комитета стало создание CIE-модели цветового восприятия, вобравшей в себя лучшие черты известных моделей (при одновременном уходе от их недостатков). Модель CIE получила название CIECAM97s и была рекомендована комиссией к общему употреблению, дабы ее повсеместная обкатка и дальнейшее развитие способствовали созданию еще лучшей модели (что в конечном счете воплотилось в CIECAM02).

После публикации CIECAM97s комитет был по общему согласию расформирован.

TC1-27 «Спецификация цветового восприятия при сравнительной оценке изображений на отражающих носителях и самосветящихся дисплеях»

Технический комитет CIE 1-27 был утвержден для оценки дееспособности различных моделей цветового восприятия в контексте репродуцирования изображений по цепочке «CRT-дисплей→отпечаток». Комитет также опубликовал набор руководств по координации необходимых исследований (Алесси, 1994), но в основном его деятельность была основана на опытах Брауна и Ло (описаны в разделе 15.5), а также дополнительных экспериментах, проведенных еще четырьмя лабораториями. Предполагалось, что TC1-27 соберет и подытожит результаты различных исследований, а также подготовит доклад о перспективах развития на ближайшие несколько лет.

Совместно с TC1-34 комитет работал над оценкой CIECAM97s.

TC1-33 «Цветопередача»

Как будет показано в 18-й главе, вычисление индекса цветопередачи источников освещения основано на весьма устаревшем цветовом пространстве, поэтому TC1-33 утвердил новую процедуру расчета данного показателя.

Существует два аспекта проблемы расчета индекса цветопередачи источников освещения: первый состоит в спецификации вычислительной процедуры; второй — в выборе цветового пространства. Также не уйти от привлечения к делу какой-либо модели цветового восприятия, поскольку необходимо сравнение индексов цветопередачи источников с разной цветностью.

TC1-33 разработал новую процедуру и опубликовал заключительный отчет (CIE, 1999), однако не снабдил его развернутыми рекомендациями.

TC1-52 «Расчет смены хроматической адаптации»

TC1-52 был утвержден для разработки методики расчета смены хроматической адаптации, пригодной к использованию независимо от той или иной модели цветового восприятия. Комитет собрал и проанализировал различные данные и виды расчетов, но не смог дать единой рекомендации, поскольку разные модели адаптации в целом работали одинаково. Очевидное и самое простое решение — использовать расчет, взятый из CIECAM02, — с комитетом согласовать не удалось.

Финальный отчет TC1-52 по анализу ситуации и результатам работы опубликован CIE в 2003 г.

R1-24 «Модели цветового восприятия»

После роспуска TC1-34 первое подразделение CIE утвердило информационный подкомитет по моделям цветового восприятия, который должен был следить за развитием профильных отраслей промышленности и готовить рекомендации для CIE по вопросам создания новых комитетов.

Подкомитет был утвержден сравнительно недавно, а до того за деятельность CIE по вопросам моделей цветового восприятия отвечал TC1-08, и именно он принимал решение о публикации CIECAM02.

TC1-08 «Моделирование цветового восприятия для Color Management»

Работа TC1-08 оказалась весьма продуктивной, ее итогом явилось создание и тестирование CIECAM02 (см. гл. 16 и отчет CIE от 2004 г.). Результаты тестирования опубликованы во множестве статей, в частности в статьях Фершильда (2001), Ли (2002) и Морони (2002).

Сравнительно недавно комитет закончил свою работу и со всеобщего согласия был распущен.

TC8-04 «Адаптация при смешанном освещении»

В задачу TC8-04 входит исследование методов определения статуса хроматической адаптации при смешанном освещении (например, при работе за самосветящимся дисплеем, находящимся в стандартной офисной обстановке, то есть при радикальном отличии цветности освещения от цветности белой точки дисплея). Технический отчет с практическими рекомендациями по прогнозированию цветового восприятия в подобных ситуациях ожидается в 2004–2005 гг.

TC8-08 «Тестирование пространственных моделей цветового восприятия»

Одно из будущих направлений дальнейшего развития моделей цветового восприятия — это систематическое и автоматизированное моделирование пространственных свойств человеческого зрения (см. гл. 20). TC8-08 был сформирован в 2003 г. с целью отработки концепции оптимизации психофизической оценки моделей данного класса, предназначенных, в частности, для работы с т.н. изображениями большого динамического диапазона (high-dynamic-range images — HDR).

R8-05 «Восприятие изображений»

С пространственными моделями цветового восприятия тесно связан новый

общий класс моделей, именуемый «модели восприятия изображений» (см. гл. 20). В 2003 г. был сформирован информационный подкомитет, в задачу которого вошли контроль развития означенного сектора и своевременная рекомендация по созданию соответствующего комитета для разработки единой модели. Однако нет оснований полагать, что в ближайшие годы модели восприятия изображений достигнут того уровня, при котором можно будет вести речь о создании модели CIE. Стоит сказать, что сегодняшнее состояние моделей восприятия изображений примерно такое же, как состояние традиционных моделей цветового восприятия 20 лет назад.

R8-06 «Итоги CIECAM02»

После роспуска TC8-01 был утвержден информационный подкомитет R8-06, в задачу которого были включены тестирование CIECAM02 и контроль ее практического применения, а также своевременная рекомендация по созданию нового технического комитета, обязанного публиковать результаты исследований по дальнейшему совершенствованию моделей цветового восприятия. Однако сегодня нет никаких признаков того, что пересмотр CIECAM02 произойдет столь же быстро, как пересмотр ее предшественника (CIECAM97s).

17.7 ВИЗУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МОДЕЛЕЙ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

Никакие наборы уравнений, списки среднеквадратических отклонений или коэффициенты вариабельности не могут объективно отразить различия между моделями цветового восприятия: для объективной и окончательной оценки различий необходимо рассматривание изображений, рассчитанных с помощью каждой из исследуемых моделей.

На рис. 17.4–17.6 показаны результаты прогнозов, выполненных с помощью традиционных моделей восприятия (Фершильд и Ренифф, 1996). Несмотря на то, что сегодня эти модели уже устарели, контекст рассчитанных ими изображений весьма красноречив в плане выявления отличий между прогнозами. Отметим, что рис. 17.4–17.6 не могут использоваться для выявления лучшей модели — их задача состоит лишь в том, чтобы показать относительные отличия между прогнозами, и поэтому условия просмотра рисунков не имеют принципиального значения (хотя D65-имитатор при довольно высокой яркости был бы идеальным вариантом просмотра).

Рис. 17.4 демонстрирует набор изображений, которые были рассчитаны тринадцатью разными моделями и предназначены для рассматривания при D65-осветителе в качестве согласованных с оригинальным изображением, рассматривавшимся при A-осветителе.

Расчеты были выполнены: CIELAB, CIELUV, LABHNU2 (Ритчер, 1985), моделью фон Криза, «спектрально-заостренной» моделью фон Криза (Дрю и Финлейсон, 1994), ATD, Наятани, хантовской с учетом КОО (когнитивного обесцвечивания осветителя), хантовской без учета КОО, хантовской с учетом неполно-

ты адаптации (и без учета эффекта Хельсона — Джадда), RLAB с учетом КОО, RLAB с частичным учетом КОО и RLAB без учета КОО.

Отметим ряд особенностей данного набора (оригинал находится в левом верхнем углу):

— непосредственная XYZ-репродукция демонстрирует оригинальные стимулы изображения при A-осветителе, то есть без применения какой-либо модели смены адаптации;

— по твердым копиям в данной ситуации поведение RLAB-модели и модели Ханта очень сходно с работой фонкризовской модели и, как мы видим, дает наилучшие результаты;

— LLAB-модель дает более насыщенные красные тона, характеризующие ее «колбочковые чувствительности», а также синий цветотональный сдвиг как следствие нелинейности модели адаптации по синему каналу;

— CIELAB в сравнении с фонкризовской моделью дает цветотональные сдвиги (обычно отмечаемые на небе и траве) из-за своей «псевдофонкризовской» модели адаптации;

— желтоватость экранного изображения, рассчитанного RLAB-моделью, говорит о неполноте адаптации;

— в экранных изображениях, рассчитанных по модели Ханта, проявляет себя эффект Хельсона — Джадда (желтые света, синие тени), который у модели Наятани выражен сильнее всего;

— слайд-изображения, рассчитанные по Ханту, весьма близки к экранной копии, рассчитанной по RLAB;

— ATD-модель благодаря особенностям своего устройства (приоритет абсолютных значений стимулов) также способна к прогнозу неполноты адаптации;

— «спектрально-заостренный» фонкризовский расчет дает высоконасыщенные красные тона, что является следствием «цветоконстантной» природы «заостренных» колбочковых чувствительностей;

— CIELUV и LABHNU2 дают неприемлемые сдвиги по цветовому тону, вследствие того, что их модель адаптации построена на субтрактивном сдвиге координат цветности (см. раздел 10.5). Фактически эти модели выдают предикторы, лежащие вне охвата физически воспроизводимых стимулов (правда, при том условии, что расчет смены адаптации выполнен для ситуации перехода от D65- к A-условиям, но не наоборот, как в нашем примере).

Рис. 17.5 демонстрирует отличия в прогнозах яркостно-зависимых моделей при переходе от адаптирующей яркости в 100 cd/m^2 к адаптирующей яркости в 10000 cd/m^2 (при неизменной белой точке на D65).

К яркостно-зависимым моделям относятся: ATD, LLAB, модель Наятани, хантовская и RLAB. Отметим, что охват оригинального изображения был подвергнут компрессии, дабы предикторы всех моделей оставались в пределах этого охвата.

RLAB-модель слабо зависит от яркости и поэтому дает изображение весьма близкое к оригиналу.

Модели Ханта и Наятани выдают изображения с пониженным контрастом, т.к. учитывают эффекты Ханта и Стивенса. На нормальный визуальный кон-



Рис. 17.4 Сравнение прогнозов, выполненных различными моделями цветового восприятия для ситуации перехода от хроматической адаптации по A-осветителю к адаптации по D65-осветителю. Оригинальное изображение представлено прямым репродуцированием *XYZ*-значений пикселов (без расчета смены адаптации).
Оригиналы: Portland Head Light, Kodak Photo Sampler PhotoCD, © 1991, Eastman Kodak; Picnic, Courtesy Eastman Kodak; Macbeth ColorChecker® Color Rendition Chart.

траст такие изображения выходят, когда рассматриваются при высоких уровнях фотометрической яркости. Отметим, что модель Наятани прогнозирует большую степень яркостной зависимости, нежели хантовская модель.

ATD дает инвертный прогноз, согласно которому для рассматривания при больших уровнях фотометрической яркости понадобится более субъектив-

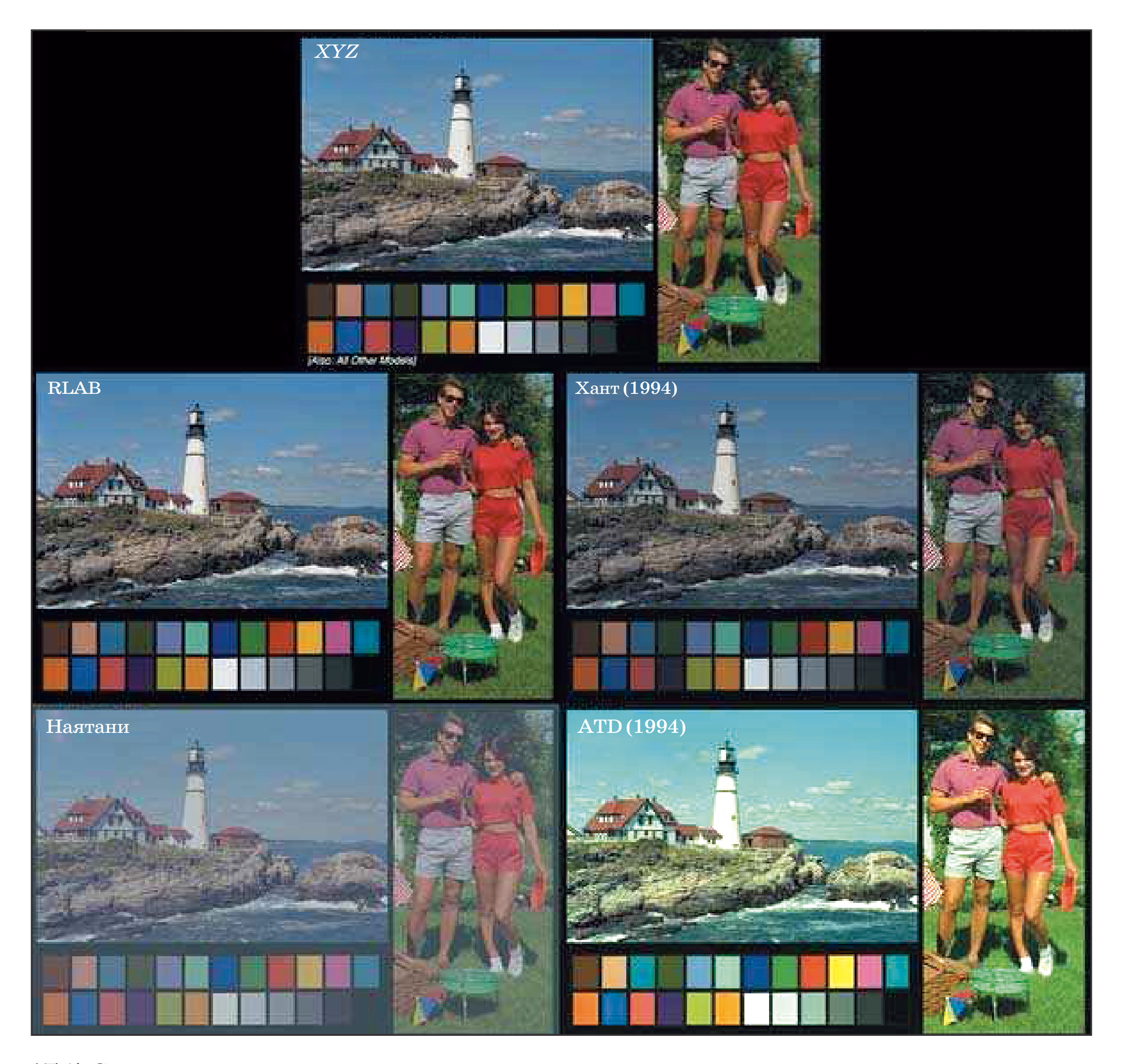


Рис. 17.5 Сравнение прогнозов, выполненных различными моделями цветового восприятия для ситуации перехода от фотометрической яркости D65-осветителя в 100 cd/m^2 (рассчитанна по идеальному отражающему рассеивателю) к 10000 cd/m^2. Оригинальное изображение представлено репродуцированием XYZ-значений без учета светимости, что эквивалентно прогнозу, выполненному моделями, не способными к такому учету.

но-яркое и более контрастное изображение. Такой прогноз, конечно же, некорректен.

Рис. 17.6 демонстрирует дополнительные прогнозы, выполненные моделями LLAB, Ханта и RLAB при переходе от среднего окружения к темному и при постоянной белой точке на D65. Напомним, что все три модели чувствительны к изменениям в окружении стимулов и демонстрируют повышение контраста изображения, необходимое для рассматривания изображения в темном окружении. Прогнозы, выполненные моделями LLAB и RLAB, весьма схожи друг с другом, RLAB предсказывает чуть более сильный эффект.

Отметим, что хантовская модель для расчета необходимого изменения контраста задействует т.н. функции дополнительных поправок, из-за чего некоторые темные стимулы получают предикторы с отрицательными трехстимульны-



Пикселы с отрицательными трехстимульными значениями, приравненные к $X0\ Y0\ Z0$

Рис. 17.6 Сравнение прогнозов, выполненных различными моделями цветового восприятия для ситуации перехода от среднего окружения к темному при постоянной яркости D65-осветителя. Оригинальное изображение представлено репродуцированием XYZ-значений без учета изменений в окружении, что эквивалентно прогнозу, выполненному моделями, не способными к такому учету.

ми значениями. Поскольку это физически абсурдно, пикселы изображения, за которыми значится нереальный стимул, приравниваются к черному. Сказанное иллюстрирует один из практических недостатков хантовской модели.

18 ЦЕЛЕВОЕ НАЗНАЧЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

Было бы весьма странным, если бы результаты усилий, затраченных на создание, развитие и совершенствование моделей цветового восприятия, не находили своего практического применения, оставаясь лишь плодами академического любопытства в сфере изучения феноменов цветового зрения. Нельзя не отметить, что в последние годы в развитии техники и технологии произошел серьезный скачок, подтолкнувший ученых к дальнейшим исследованиям физиологии цветового восприятия и к созданию его моделей. Области, которым необходимы такие исследования, можно разделить на две общих категории:

1. Воспроизведение изображений (см. гл. 19).
2. Цветовое измерение и спецификация (см. текущую главу).

Колориметрия поступательно развивалась в течение всего XX века, но для многих ситуаций вполне достаточной была и остается простая трехстимульная колориметрия (XYZ) или, в крайнем случае, спецификация цветовых отличий CIELAB-класса. Однако наряду с ними существует ряд областей, хоть и использующих по-прежнему традиционную колориметрию, но настоятельно требующих ее дальнейшего развития. Некоторые из них мы рассмотрим в текущей главе.

18.1 ЦВЕТОПЕРЕДАЧА ИСТОЧНИКОВ ОСВЕЩЕНИЯ

Цветопередача — термин, относящийся к влиянию различных источников освещения на цветовое восприятие объектов или, как еще говорят, к «передаче» цвета объектов. К примеру: два источника могут иметь почти одну и ту же цветность, но первый источник — это источник естественного белого дневного света, а другой — флуоресцентный двухлюминофорный светильник, в котором узкоспектральные потоки смешиваются для получения почти такого же белого. Несмотря на то, что цветовое ощущение, вызываемое обоими источниками, практически одинаково, результат цветового восприятия освещенных ими объектов будет принципиально разным. Учет данного явления весьма важен при устройстве искусственного освещения, а также при выборе источников для различных помещений.

Если пытаться характеризовать освещение только его световой эффективностью, то восприятие объектов при нем будет оставаться совершенно непредсказуемым. Поэтому для решения вопроса характеризации источников освещения CIE определила т.н. *индекс цветопередачи* (color rendering index — CRI),

который является мерой качества данного источника по параметру «передачи» цвета объектов.

Методы и рекомендации

Рекомендации CIE по расчету индекса цветопередачи источников освещения прописаны в CIE-публикации №13.3 (CIE, 1995), где источники света оцениваются относительно эталонных осветителей, которые, в свою очередь, разделены комиссией на две категории:

— D-серия — осветители с цветовой температурой, большей или равной 5000 К;

— планковские излучатели — осветители с цветовой температурой, меньшей 5000 К.

Эталонный осветитель выбирается так, чтобы его коррелированная цветовая температура была ближайшей к коррелированной цветовой температуре тестируемого источника. Отличия в цветности между тестируемым источником и эталонным осветителем необходимо учесть, дабы в дальнейшем была возможность выполнить фонкризовский расчет смены хроматической адаптации.

Т.н. *специальный индекс цветопередачи* (R_i), согласно CIE-методу, вычисляется по уравнению 18.1:

$$R_i = 100 - \Delta E_i \tag{18.1}$$

где ΔE_i — это эвклидово расстояние в цветовом пространстве CIE $U^*V^*W^*$ (ныне устаревшем) между цветовыми координатами образца, освещенного тестируемым источником, и эталонным осветителем.

Т.н. *общий индекс цветопередачи* (R_a) определен как среднее арифметическое из восьми специальных индексов цветопередачи, рассчитанных по восьми манселловским образцам[1]. Примеры общих индексов цветопередачи ряда источников даны в табл. 18.1.

Применение моделей цветового восприятия

Основной проблемой спецификации цветопередающих свойств световых источников является описание восприятия окрашенных объектов, поскольку

---

[1] Здесь нельзя исключить ошибку, поскольку по данным ряда источников (в частности: Цвет в промышленности / Под. ред. Р. Мак-Дональда. М.: Логос, 2002) специальный и общий индексы цветопередачи рассчитываются по формулам:

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i$$

$$R_a = 100 - \left[\frac{4.6}{8} \times (\Delta E_i + \Delta E_{i2} + \Delta E_{i3} + \Delta E_{i4} + \Delta E_{i5} + \Delta E_{i6} + \Delta E_{i7} + \Delta E_{i8})\right]$$

К сожалению, поиск первоисточника (CIE Publication 13.3) не увенчался успехом. — *Прим. пер.*

Таблица 18.1 Примеры значений общего индекса цветопередачи[1]

Источник	R_a
Галогенная лампа накаливания	100
D65-осветитель	100
Ксеноновая лампа	93
Флуоресцентная лампа дневного света	92
Флуоресцентная лампа холодного дневного света	58
Трехполосная флуоресцентная лампа	85
Натриевая лампа высокого давления	25
Ртутная лампа	45
Металло-галогенная лампа	80

в ряде случаев необходимо сравнить восприятие объектов под источниками разной цветности (а порой интересно сравнить передающие свойства источников с разным уровнем яркости). Для выполнения сравнений цветового восприятия при смене цветности и интенсивности освещения требуется высокоточная модель цветового восприятия. Используя методику CIE, изложенную в упомянутом документе, можно, к примеру, сравнить качество цветопередачи под лампами накаливания с качеством цветопередачи при дневном свете и получить при этом весьма информативные результаты.

Перспективы развития

Несмотря на то, что существуют специально оборудованные помещения, предназначенные для прецизионного измерения цветопередачи (основанного на высокоточной модели цветового восприятия), сегодняшний статус моделей сужает диапазон потенциальных возможностей этого индекса. Недавно TC1-33 («Цветопередача») предложил ряд процедур по пересмотру существующей спецификации: первым шагом было определение схемы расчета, не зависящей от используемого цветового пространства. Предложенная процедура задействует цветовую систему CIELAB в связке с усовершенствованным расчетом смены хроматической адаптации, что должно стать серьезной модификацией действующего индекса (одно время обсуждалась кандидатура нелинейной схемы Наятани, но сейчас ясно, что наилучшим решением является CAT02).

Сегодняшний расчет индекса цветопередачи (при котором источники сравниваются только со стандартным осветителем, обладающим той же коррелированной цветовой температурой) в случае серьезных изменений в хроматической адаптации наблюдателя не предполагает использования какой-либо модели цветового восприятия. Следовательно, весьма сомнительно, что попытки

[1] В оригинале название таблицы звучит как «Примеры значений индексов цветопередачи», но по факту присутствует лишь колонка с общим индексом (R_a).— *Прим. пер.*

выполнить расчет индекса на основе той или иной развитой модели будут успешнее, чем традиционный расчет, основанный на CIELAB. Использование более полной модели цветового восприятия станет реальным, когда появится теоретически более обоснованный и сложный метод спецификации цветопередачи при больших отличиях в цвете источника и/или уровне его яркости.

18.2 ЦВЕТОВЫЕ ОТЛИЧИЯ

Измерение цветовых отличий востребовано в очень многих отраслях промышленности. Оно требуется для установки цветовых допусков на разного рода продукцию, и, в частности, на окрашенные материалы всех видов. В современной ситуации идеальной явилась бы единая метрика цветовых отличий, например CIELAB ΔE^*_{ab}, которую можно было бы рассматривать как пропорциональную шкалу отличий между цветовыми ощущениями. От такой шкалы требуется, чтобы:

— цветовые отличия постоянной перцепционной величины имели постоянную величину ΔE^*_{ab} во всех областях цветового пространства;

— перцепционные отличия линейно соотносились с измеренной ΔE^*_{ab};

— ΔE^*_{ab}-значения, измеренные при одном осветителе, были бы перцепционно равны ΔE^*_{ab}-значениям, измеренным при другом осветителе (то есть так, чтобы цветовые отличия можно было напрямую сравнивать при разных источниках).

Однако, хорошо известно, что цветовое пространство CIELAB неравномерно и не может удовлетворить вышеперечисленным требованиям, более того — поставленная задача практически не имеет решения ни в одном из эвклидовых цветовых пространств.

Методы и рекомендации

Внешние и внутренние усилия CIE сегодня направлены на решение проблемы ущербности примитивной формулы CIELAB ΔE^*_{ab}, к примеру, для того чтобы компенсировать некоторые неравномерности CIELAB-пространства (то есть для того чтобы измерения, выполненные в одной области пространства, были бы эквиваленты измерениям в других областях), в свое время была разработана уже неоднократно упоминавшаяся CMC-формула.

TC1-29 изучил уравнение CMC (и ряд других уравнений) в качестве потенциальных модификаторов CIELAB ΔE^*_{ab}-формулы и пришел к заключению, что уравнение CMC слишком громоздко и сложно, после чего разработал упрощенную формулу, известную как CIE ΔE^*_{94} (CIE, 1995). Расчет ΔE^*_{94} производится по уравнениям 18.2–18.5:

$$\Delta E^*_{94} = \sqrt{\left[\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*_{ab}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*_{ab}}{k_H S_H}\right)^2\right]} \qquad (18.2)$$

$$S_L = 1 \qquad (18.3)$$

$$S_C = 1 + 0.045C^*_{ab} \qquad (18.4)$$

$$S_H = 1 + 0.015C^*_{ab} \qquad (18.5)$$

где C^*_{ab} — это CIELAB-насыщенность стандартного образца (ближайшего к паре сравнения. — *Прим. пер.*) или, альтернативно, — среднее геометрическое двух величин насыщенности образцов сравнения; k_L, k_C и k_H — параметрические коэффициенты, предназначенные для коррекции возможных вариаций цветовых отличий, вызванных некоторыми экспериментальными переменными (размером образца, текстурой, пространственным разносом образцов и пр.). В стандартных условиях просмотра параметрические коэффициенты выставляются на 1.0, а сами стандартные условия определены так:

Источник освещения: CIE D65-имитатор.

Освещенность: 1000 lux.

Наблюдатель: наблюдатель с нормальным цветовым зрением.

Зрительская интерпретация: объектная.

Размер образца: больше 4° визуального угла.

Пространственный разнос образцов: минимальный (край в край).

Диапазон измеряемых цветовых отличий: 0–5 CIELAB-единиц.

Структура образца: визуально однородный.

Эталонные условия для ΔE^*_{94} иллюстрируют ущербность CIELAB-пространства в вопросах спецификации цветового восприятия, то есть, налицо ситуация, в которой для эффективной оценки цветовых отличий необходимо использование моделей цветового восприятия.

Относительно недавно CIE рекомендовала существенно более сложное эмпирическое уравнение цветовых отличий DE2000 (CIE, 2001), также основанное на CIELAB-пространстве. Формула DE2000, на наш взгляд, слишком сложна, и эта сложность не оправдывается точностью, которая избыточна для заурядных перцепционных ситуаций. Таким образом, чаще всего уравнения ΔE^*_{94} — это самый разумный и практичный выбор.

Применение моделей цветового восприятия

Для учета влияния ряда параметров в сфере спецификации цветовых отличий модели цветового восприятия могут быть внедрены прямо в формулы расчета, к примеру, высокоточная модель восприятия может быть задействована для учета эффектов фона, уровня фотометрической яркости и пр. Модель восприятия также способна и к прямому сравнению цветовых отличий, измеренных в разных условиях просмотра, то есть модели цветового восприятия находят свое применение и в расчете индекса метамеризма (описан ниже).

Модели цветового восприятия могут быть задействованы в вычислении цветовых отличий между первым образцом, рассматриваемым в одних условиях, и вторым образцом, рассматриваемым в иных условиях. Последнее необходимо в случаях, когда цвет критичен, например в предупреждающих надписях или корпоративных торговых марках.

Есть все основания ожидать, что формула цветовых отличий будет рано или

поздно интегрирована в пространство цветового восприятия, например CIECAM02, и будет работать не хуже (если не лучше), чем ΔE^*_{94} или DE2000 (что совсем недавно продемонстрировал Ли с колл. [2003]).

Перспективы развития

Внедрение моделей цветового восприятия в практику спецификации цветовых отличий идет очень вяло, и, возможно, потому, что в свое время было затрачено много сил и средств на доработку и шлифовку CIELAB по данному параметру. Вместо того чтобы начинать применять модели восприятия, текущая исследовательская работа (которая и без того более чем скромна) нацелена на дальнейшее совершенствование уравнений в лоне CIELAB (к примеру, ΔE^*_{94} и DE2000), а также на определение степени влияния на цветовые отличия таких параметров, как глянец, текстура, пространственный разнос образцов, размер образцов и пр. Вместе с тем, бóльшая часть усилий, затраченных в свое время на создание моделей восприятия, была направлена на создание схемы расчета смены хроматической адаптации, тогда как вопросам спецификации цветовых отличий в рамках пространств цветового восприятия уделялось совсем мало внимания. Исключением является LLAB-пространство (Луо и колл., 1996), в которое одновременно включены как учет цветового восприятия, так и расчет цветовых отличий. Сравнительно недавно Ли (Ли, 2003) доложил о том, что аналогичная работа ведется в отношении CIECAM02. Отметим также, что при создании RLAB-пространства (Фершильд, 1996) в нем были сохранены интервалы CIELAB, то есть модель RLAB предусматривает возможность применения к ней формул ΔE^*_{94}.

Еще одним интересным направлением развития в сфере спецификации цветовых отличий является учет пространственных характеристик зрительной системы человека, в частности, относительной чувствительности зрения к вариациям пространственных частот цветовых стимулов. Примеры можно найти в работе Максимус и колл. (1994), Чанга и Ванделла (1996), а также Джонсона и Фершильда (2003), а в 20-й главе нашей книги обсуждаются возможные перспективы этих идей.

18.3 ИНДЕКСЫ МЕТАМЕРИЗМА

Метамеризм — это явление, суть которого состоит в том, что два стимула, имеющие несопоставимо разные спектральные распределения энергии, могут соответствовать друг другу по цвету. Разным отраслям явление метамеризма может приносить как большую пользу, так и колоссальный вред, поэтому количественная оценка метамеризма крайне необходима.

Существует два вида измеряемого метамеризма:

1. Метамеризм осветителя.
2. Метамеризм наблюдателя.

Измеренная степень метамеризма той или иной пары стимулов выражается т.н. индексом метамеризма.

Метамеризм осветителя доставляет больше всего хлопот: он имеет место,

если два объекта соответствуют друг другу по цвету при одном осветителе, но не соответствуют при другом. Такое случается, когда функции спектрального коэффициента отражения двух стимулов (образцов) различны, но эти отличия (при осветителе с данным спектральным распределением) не важны в отношении функций визуального ответа (функций цветового соответствия). Если же осветитель заменить, отличия могут стать очевидными для наблюдателя. Метамеризм осветителя — это весьма частая проблема отраслей, производящих окрашенные материалы, так как две окрашенных поверхности, метамерно равных друг другу в одних условиях просмотра, часто теряют равенство в других условиях. Если два окрашенных материала совершенно идентичны, то есть идентичны их функции спектрального коэффициента отражения, то эти материалы не метамерны и будут соответствовать друг другу по цвету при любом осветителе.

Метамеризм наблюдателя — это вполне естественная вариабельность цветовой чувствительности наблюдателей. Метамеризм наблюдателя гораздо более сложен для количественного описания, но не менее важен.

Метамеризм наблюдателя определяется двумя стимулами с различными спектральными распределениями энергии, совпадающими по цвету для данного наблюдателя. Когда эти же стимулы оценивает другой наблюдатель, соответствие может распасться. В то же время, ясно, что два стимула с одинаковым спектральным распределением энергии будут совпадать по цвету для любого наблюдателя.

Итак, метамеризм осветителя становится очевидным, когда меняется осветитель, а метамеризм наблюдателя проявляет себя, когда меняется сам наблюдатель.

Методы и рекомендации

CIE-публикация за № 15.2 (CIE, 1986) описывает метод вычисления индекса метамеризма при смене осветителя. Фактически это рекомендация расчета CIELAB ΔE^*_{ab} (или иной метрики цветовых отличий) при том осветителе, при котором два стимула не соответствуют друг другу по цвету. Таким осветителем явится любой источник, кроме того, при котором стимулы одинаковы по ощущению (последний в логике данных рассуждений является для нас первичным источником).

Неясным остается то, как вычислять индекс метамеризма, когда два стимула неидеально совпадают при первичном источнике (то есть, по сути, метамеризма нет вообще) и если, к тому же, цветовое отличие между стимулами нестабильно (о попытках решения данной проблемы в свое время активно говорил Ферман [1987]).

CIE-публикация за № 80 (CIE, 1989) описывает метод вычисления индекса метамеризма при смене наблюдателя: стандартный колориметрический наблюдатель заменяется на т.н. *стандартного девиантного наблюдателя* (standard deviate observer), и цветовые отличия между двумя стимулами рассчитываются по новому наблюдателю. Мысль в целом верная, однако нужно помнить, что данные, на которых основан стандартный девиантный наблюдатель,

были получены с допущением, что наблюдателю присуща определенная степень метамеризма (Альфвин и Фершильд, 1997).

Нимеров и колл. (1961) дают методику, которая позволяет описать полную систему стандартного наблюдателя, включающую усредненные и ковариантные функции цветового соответствия. Идея Нимерова сходна с концепцией CIE, но в жизнь не воплощена из-за недостатка данных.

Применение моделей цветового восприятия

В количественном описании метамеризма осветителя модели цветового восприятия могут оказаться полезны, поскольку имеют дело со сравнением стимулов при смене осветителя. Фактически, учет индекса метамеризма осветителя — это и есть вклад модели восприятия в метрику цветовых отличий. Плюс к тому, высокоточная модель цветового восприятия создает новый тип метрики — метрику отличий единичного стимула (понятие «метамерный» неприменимо к единичному стимулу, поскольку последний ни с чем не сравнивается, однако можно говорить о том, что единичный стимул метамеричен, когда при смене осветителя наблюдаются выраженные изменения его цвета, то есть когда имеет место недостаток цветовой константности). Хорошая модель цветового восприятия должна позволять вычислять метрику отличий между образцом, рассматриваемым под одним осветителем, и тем же образцом, рассматриваемым под другим осветителем, позволяя тем самым определять т.н. *индекс цветовой константности*. Индекс может оказаться полезен в отношении тех объектов, цвет которых должен оставаться неизменным при меняющихся условиях освещения (например, т.н. «цвета безопасности»).

Для спецификации индекса метамеризма наблюдателя модель восприятия малопригодна: измерение метамеризма наблюдателя — это великолепный пример ситуации, в которой проблема полностью решается на уровне базовой колориметрии. Иными словами, прежде чем обращаться к дополнительным свойствам моделей восприятия, вариабельность наблюдателей должна быть адекватно описана на уровне трехстимульных значений. Такая схема должна быть принята в отношении всех потенциальных сфер применения моделей цветового восприятия.

Перспективы развития

Сегодня к совершенствованию индексов метамеризма не прилагается почти никаких усилий, ведется лишь некоторая работа в плане совершенствования метрики цветовых отличий при метамеризме осветителя. В отношении метрики метамеризма наблюдателя (которой сегодня мало кто пользуется) также ожидается некоторое улучшение ситуации (даже несмотря на серьезные недостатки существующей метрики), потому что нельзя вплотную заняться решением проблем метрики метамеризма осветителей, не решив текущих проблем с метрикой наблюдательского метамеризма.

18.4 ЕДИНАЯ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА?

Размышления о некоторых проблемах традиционной колориметрии, описанные в текущей главе, ведут к возникновению законного вопроса: а возможно ли вообще создание единой колориметрической системы, способной к решению всех потенциальных задач?

Колориметрия прошла путь интенсивного развития от CIE XYZ, через CIELAB, к расширенной системе CIELAB, способной измерять цветовые отличия и характер цветового восприятия. Сегодняшний уровень развития колориметрии гарантирует возможность эффективной цветовой коммуникации между отраслями, использующими прежние стандартные методы цветового измерения. Однако уровень сложности решаемых сегодня задач требует применения той или иной модели цветового восприятия, выбор которой определяется спецификой отрасли.

В свое время CIELAB- и CIELUV-пространства (рекомендованы CIE в 1976 г.) остановили ураганный рост числа всевозможных уравнений расчета цветовых отличий и сократили количество формул до двух международно утвержденных. Результат оказался весьма удачным — CIELAB-пространство стало фактически единственным повсеместно используемым цветовым пространством. Возможно, сегодня аналогичным образом обстоят дела и в отношении моделей цветового восприятия, и недавние распоряжения CIE наконец наведут в этой области определенный порядок. Однако, вероятнее всего, системы описания цветового восприятия и системы описания цветовых отличий на практике по-прежнему будут использоваться отдельно друг от друга.

В 1996 г. Луо предпринял интересную попытку интеграции колориметрии в общую модель (LLAB), а в 2003 Ли начал аналогичную работу в отношении CIECAM02. Однако существует и альтернативный подход к решению проблемы — начать всё заново: все современные успехи науки о зрении и все достижения колориметрии за прошедшее столетие направить на создание принципиально новой системы колориметрии, априори более прогрессивной и развитой, которая найдет широкое применение в науке, технологии и промышленности. Участком, за который в данной работе отвечают модели цветового восприятия, является преобразование CIE-трехстимульных значений в колбочковые ответы с последующим расчетом коррелятов цветового восприятия.

В рамках CIE ведется работа по развитию системы колориметрии (к примеру, TC1-36 «Фундаментальная диаграмма цветностей с физиологически значимыми осями»), основанной на более точных колбочковых ответах (не связанных со стандартным колориметрическим наблюдателем), и есть все основания полагать, что такая система найдет широкое применение в исследованиях цветового зрения (Бойнтон, 1996).

Возможно, что для создания единой и радикально лучшей системы колориметрии, которая бы верно служила всем, потребуется определенное сближение двух описанных направлений работы.

К великому сожалению, последний раздел текущей главы, написанный еще в 1997 г. для первой редакции нашей книги, остается столь же актуален и для второго ее издания в 2004-м!

19 АППАРАТНО-НЕЗАВИСИМОЕ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

Представим себе: пользователь компьютера взял фотографию, отсканировал ее, полюбовался ею на экране монитора и, наконец, напечатал на цифровом принтере. Что сделал пользователь? — прошел по меньшей мере три принципиальных этапа ввода, обработки и отображения. Однако, несмотря на весьма высокую стоимость цветовоспроизводящих аппаратов, крайне маловероятно, что цвета окончательного отпечатка будут идентичны оригинальным (или хотя бы похожими на них). В такой ситуации мы говорим, что пользователь получил лишь промежуточные, пробные изображения, которые он сравнивает как между собой, так и с оригиналом.

Система, описанная выше, — это т.н. «открытая система». Словосочетание «открытая система» означает, что каждый компонент этой системы пользователь выбирает отдельно, а затем соединяет их в единый функциональный механизм, в котором каждое из устройств выполняет персональную физическую функцию: ввод изображения, обработку и/или отображение (при этом совершенно необязательно, чтобы устройства были специально сконструированы для работы в тесной связке друг с другом). Однако когда каждое из устройств работает в своем собственном режиме, то результаты, полученные при помощи открытой системы, скорее всего окажутся непредсказуемыми, и единственным ощутимым плюсом во всем этом будет только сам открытый характер системы, поскольку в этом случае количество возможных комбинаций устройств, обеспечивающих их эффективную совместную работу — неограниченно.

Позволяя устройствам действовать в их индивидуальных «цветовых» размерностях, мы реализуем процесс т.н. *аппаратно-зависимого цветовоспроизведения* (device-dependent color imaging). Сложность работы с аппаратно-зависимыми данными состоит в том, что RGB-сигналы сканера — это далеко не то же самое, что RGB-сигналы, управляющие монитором или принтером. Для решения описанных выше проблем и получения надежных и предсказуемых результатов, работой открытой системы должен руководить принцип т.н. *аппаратно-независимого цветовоспроизведения* (device-independent color imaging).

Концепция аппаратно-независимого цветовоспроизведения состоит в обеспечении системы полной цветовой информацией об изображении, позволяющей, в случае необходимости, описать данные изображения в показателях, которые не относятся к какому-либо специфическому устройству. В дальнейшем для передачи аппаратно-независимых данных (цветовых координат) какому-либо другому устройству открытой системы выполняются определенные математические преобразования.

За последнее десятилетие в развитии аппаратно-независимого цветовоспроизведения произошел мощный технологический скачок, востребовавший (поскольку изображения обычно рассматриваются в широком диапазоне условий

просмотра) огромный научный потенциал сферы моделирования цветового восприятия. Отметим, что понимание того, насколько в деле аппаратно-независимого цветовоспроизведения необходимо участие какой-либо модели цветового восприятия, пришло довольно давно, однако долгое время не существовало простого и эффективного решения этой задачи.

Предыдущие главы нашей книги были посвящены некоторым спорным вопросам и проблемам, которые было нельзя не обсудить, тогда как текущая глава — это лишь краткий обзор основных концепций аппаратно-независимого цветовоспроизведения и его систем.

За последние несколько лет аппаратно-независимое цветовоспроизведение оказалось в центре внимания многих исследователей и инженеров. К сожалению, в одной главе невозможно подробно описать все сегодняшние проблемы, но заметим, что за последнее время стали доступными целые монографии, посвященные вопросам аппаратно-независимого цветовоспроизведения (Диорджианни и Мадден, 1997; Канг, 1997; Шарма, 2003).

В последние годы все более и более популярными становятся т.н. системы управления цветом (CMS), и публикуется множество книг, им посвященных и нацеленных в основном на «продвинутого» пользователя (к примеру, Фрезер, 2003; Стоун, 2003). В дополнение к ним книга Ханта, посвященная концептуальным основам цветовоспроизведения (Хант, 1995)[1], дает фундаментальное теоретическое обоснование его процессов. Плюс к тому, Шарма и Трассел в 1997 г. опубликовали обзорную статью, посвященную вопросам цифрового цветовоспроизведения, содержащую сотни ссылок.

В текущей главе разговор пойдет на основе серии недавних работ автора данной книги (1994, 1995, 1996).

19.1 СУТЬ ПРОБЛЕМЫ

Применение базовой колориметрии радикально модернизирует устройство открытых систем визуализации, определяя взаимоотношения между т.н. *аппаратными координатами* (к примеру, RGB, CMYK) и цветовыми стимулами (регистрируемыми или воспроизводимыми этими системами). Однако важно отметить, что согласование CIE-трехстимульных значений между устройствами — это лишь первый этап общей «эпопеи»: если изображение воспроизведено так, что трехстимульные значения его элементов идентичны таковым в оригинале, то это изображение будет визуально соответствовать оригиналу лишь до тех пор, пока оба рассматриваются в идентичных условиях (для которых, разумеется, эти трехстимульные значения были вычислены). Поскольку оригиналы, репродукции и промежуточные изображения на практике редко рассматриваются в одинаковых условиях, возникает необходимость подключения к работе систем отображения моделей цветового восприятия, дабы представлять восприятие стимулов изображения на каждой стадии процесса.

[1] В 2004 г. вышло в свет шестое, дополненное и переработанное, издание книги Р.Г.В. Ханта «Цветовоспроизведение». — *Прим. пер.*

Идеология аппаратно-независимого цветовоспроизведения такова, что модели цветового восприятия могут использоваться для учета изменений в белой точке устройства, уровне освещения, окружении, носителе и т.п., и поскольку перечисленные параметры при разных методах визуализации различны, необходимость в применении моделей цветового восприятия очевидна.

Внедрение моделей восприятия в работу цветовоспроизводящих систем позволяет настроить последние так, что можно контролировать процесс визуализации на каждой его стадии, то есть сохранять восприятие элементов изображения или целенаправленно управлять им, к примеру: пользователи, глядя на изображение, воспроизведенное экраном LCD-монитора, манипулируют им по своему усмотрению, а затем при участии той или иной модели цветового восприятия делают отпечатки, по восприятию точно воспроизводящие оригинал, отображенный на LCD.

Разумеется, точное репродуцирование восприятия оригинального изображения не всегда осуществимо, или даже не всегда желаемо, но если таковая необходимость есть — модели цветового восприятия могут оказаться весьма полезны.

Одна из проблем, встречающихся на данном пути, состоит в том, что разные устройства визуализации воспроизводят неодинаковые наборы цветовых стимулов, то есть, мы говорим, что *цветовой охват* (color gamut) устройств различен. Представим себе: некий стимул, воспроизведенный LCD-монитором, воспринимается каким-то определенным образом. Может так статься, что некий принтер не сможет сгенерировать стимул, вызывающий такое же ощущение. В таких случаях модель цветового восприятия перцепционно-оправданным путем управляет изображением, и в итоге дает наилучшие результаты (лучшие из возможных).

В иных ситуациях цветовой охват репродукции могут ограничить сами условия просмотра, к примеру: фотоотпечатки уличных сюжетов часто рассматривают при искусственном освещении, то есть, при существенно меньших уровнях освещенности, чем у оригинальной сцены. При низких уровнях освещенности невозможно получить требуемые (т.е. как у оригинальной сцены) диапазон фотометрических яркостей и хроматический контраст оригинальной сцены. Таким образом, заказчикам фотографий нужно, чтобы физический контраст отпечатков был повышен, то есть компенсировал изменение в условиях просмотра. Модели цветового восприятия вполне пригодны для прогноза таких эффектов и соответствующего управления системами визуализации.

Отметим также, что модели цветового восприятия, применяемые в аппаратно-независимом цветовоспроизведении, хорошо зарекомендовали себя и в плане цветокоррекции: неподготовленному пользователю сподручнее манипулировать цветами через их перцепционные размерности (светлоту, цветовой тон и насыщенность), нежели через аппаратные координаты, например, CMYK. Хорошая модель цветового восприятия может радикально улучшить корреляцию между инструментом манипуляции этими размерностями и теми изменениями, которые пользователь хочет видеть в редактируемом изображении.

19.2 УРОВНИ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Роберт Хант (1970, 1995) дал академическое определение шести возможных уровней цветовоспроизведения:

1. Спектральное цветовоспроизведение

Спектральное цветовоспроизведение (spectral color reproduction) предполагает воспроизведение кривых спектрального коэффициента отражения элементов оригинального изображения или объекта.

Существуют две техники, полностью справляющиеся с этой трудной задачей (однако они столь непрактичны, что представляют собой лишь историческую ценность): метод Липпмана и микродисперсионный метод (см. Хант, 1995).

Сегодняшние методы цветовоспроизведения успешно эксплуатируют явление метамерности, задействуя аддитивные смеси *RGB*-кардинальных стимулов или смеси субтрактивных кардинальных стимулов (CMY),[1] избегая тем самым необходимости спектрального воспроизведения (за исключением случаев, при которых оригинал состоит из тех же материалов, что и его репродукция).

Отметим, что недавно разработанные и все еще развивающиеся методы печати, задействующие шесть и более красок, гораздо ближе к спектральному воспроизведению, которое (помимо собственно расширения выходного охвата изображений) могло бы быть полезным в таких сферах, как производство почтовых бланков или репродуцирование произведений живописи.

2. Колориметрическое цветовоспроизведение

Колориметрическое цветовоспроизведение (colorimetric color reproduction) определяется метамерным соответствием репродукции оригинальному изображению, при котором оба имеют одинаковые CIE-трехстимульные значения. Итогом является воспроизведение по восприятию, но только в тех случаях, когда оригинал и его репродукция имеют одинаковый размер, окружение и рассматриваются при свете источников с одинаковыми спектральным распределением энергии и фотометрической яркостью. Хант, однако, не считает равенство уровней яркости обязательным требованием колориметрического цветовоспроизведения.

3. Точное цветовоспроизведение

Точное цветовоспроизведение (exact color reproduction) определено как колориметрическое цветовоспроизведение при том обязательном условии, что уровни фотометрической яркости у оригинала и репродукции одинаковы.

---

[1] Здесь автор допускает серьезную неточность: кардинальными стимулами субтрактивного колориметра являются те же *RGB*-стимулы, тогда как CMY-пигменты выступают в роли регуляторов их интенсивности (Hunt, 2004). — *Прим. пер.*

4. Эквивалентное цветовоспроизведение

Эквивалентное цветовоспроизведение (equivalent color reproduction) предназначено для тех случаев, когда цвет освещения оригинала и репродукции различны (и, следовательно, колориметрическое цветовоспроизведение по трехстимульным значениям дает некорректный результат, поскольку не учитывает факт смены хроматической адаптации).

Эквивалентное цветовоспроизведение предполагает определенную коррекцию трехстимульных значений и величин фотометрической яркости, дабы результирующие стимулы воспринимались бы так же, как стимулы оригинала, то есть: в репродукционном аппаратно-независимом процессе какая-либо модель цветового восприятия (или хотя бы модель смены хроматической адаптации) обязательно должна учитывать отличия в условиях просмотра оригинала и его репродукции.

Когда между оригиналом и репродукцией имеются серьезные отличия по уровню фотометрической яркости, то возможно, что перцепционного соответствия достичь и вовсе не удастся, особенно если используется уравнивание по субъективной яркости/полноте цвета, а не по светлоте/насыщенности.

5. Согласованное цветовоспроизведение

Согласованное цветовоспроизведение (corresponding color reproduction) в определенной степени игнорирует проблему несоответствий по яркости и предполагает такое управление трехстимульными значениями, которое обеспечивает перцепционное равенство при условии того, что уровни яркости оригинала и репродукции одинаковы.

Согласованное цветовоспроизведение избавляет от проблем, связанных с попыткой воспроизведения ярко освещенных оригиналов в тусклых условиях просмотра и наоборот.

О согласованном цветовоспроизведении можно говорить как о приблизительном уравнивании по светлоте/насыщенности, но с допущением (априори некорректным), что при изменении величины фотометрической яркости светлота и насыщенность константны. Поскольку светлота и насыщенность в такой ситуации намного стабильнее, чем субъективная яркость и полнота цвета, сделанное допущение имеет право на существование, тем паче, что на практике неизбежен гамут-мэппинг.

6. Выделенное цветовоспроизведение

Выделенное цветовоспроизведение (preferred color reproduction) определено как цветовоспроизведение, при котором цвета репродукции отступают от перцепционного равенства с цветами оригинала во имя достижения эмоционально впечатляющего результата.

Выделенное цветовоспроизведение используется в основном в бытовой фотографии, когда заказчик отдает предпочтение передаче памятных объектных цветов (кожи человека, растительности, неба, водной поверхности и пр.). Одна-

ко Хант (1970) отмечает, что «концепция спектрального, колориметрического, точного, эквивалентного и согласованного уровней цветовоспроизведения подготавливает нас к разговору о сознательном искажении цветовой репродукции».

19.3 МОДИФИЦИРОВАННЫЙ НАБОР УРОВНЕЙ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Хантовские уровни дают категорийную классификацию задач цветовоспроизведения и предлагают их решение на основе концепций базовой и высшей колориметрий. Любопытно, что хантовские уровни были опубликованы задолго до того, как стала обсуждаться самоя идея аппаратно-независимого цветовоспроизведения (Хант, 1970). Со временем были выполнены некоторые перекомпоновки и упрощения, в результате чего от шести хантовских уровней цветовоспроизведения осталось пять, заложивших идеологическую основу современных систем визуализации.

1. Произвольное цветовоспроизведение

Произвольное цветовоспроизведение (color reproduction) относится к работе примитивных устройств, способных воспроизводить простую цветную графику и изображения весьма низкого качества. В то же время, нельзя забывать, что персональные компьютеры с приемлемыми «цветовыми способностями» существуют не более 20 лет, а рыночное изобилие высококачественных устройств ввода-вывода — это достижение совсем недавнего времени. Когда появились технологии цифрового цветовоспроизведения, пользователи были счастливы от одного только факта, что теперь они могут «работать с цветом!». Однако «медовый месяц» быстро кончился, и потребитель начал требовать от цветовоспроизводящих аппаратов много большего — он захотел иметь более управляемые и высокоточные устройства. Создавшаяся обстановка подтолкнула технологии открытых систем к переходу на следующие, качественно более высокие уровни цветовоспроизведения.

2. Визуально-комфортное цветовоспроизведение

Визуально-комфортное цветовоспроизведение (pleasing color reproduction) призвано обеспечивать лишь ощущение визуального комфорта при рассматривании изображений.

Изображения, воспроизведенные на визуально-комфортном уровне, не являются точной репродукцией оригинала, не являются высококачественными, но выглядят, что называется, «вполне прилично» и удовлетворяют запросы большинства заказчиков. Данный уровень воспроизведения часто достигается путем проб и ошибок, пренебрегающим общими концепциями аппаратно-независимого цветовоспроизведения. Подход, обеспечивающий визуально-комфортный уровень цветовоспроизведения, близок к идеологии закрытых систем, результат работы которых аналогичен и редко выходит на уровень даже выделенного цветовоспроизведения. Визуально-комфортное цветовоспроизве-

дение может быть вполне оправданной конечной целью деятельности цветорепродукционной системы в тех случаях, когда наблюдатели не знакомы с оригинальной сценой или изображением и, следовательно, не ждут ничего, кроме психологически-комфортной репродукции.

3. Колориметрическое цветовоспроизведение

Колориметрическое цветовоспроизведение (colorimetric color reproduction) априори предполагает предварительные калибровку и характеризацию цветовоспроизводящих устройств — это значит, что данному аппаратному сигналу (device signal) ставятся в соответствие те или иные колориметрические координаты, что дает требуемую степень достоверности и точности регистрации и воспроизведения изображений.

При колориметрическом цветовоспроизведении пользователь объединяет устройства в единую систему, которая:

— сканирует изображение;

— полученные данные преобразовывает в колориметрические координаты (например, CIE XYZ);

— конвертирует цветовые координаты в соответствующие аппаратные сигналы, например, RGB-сигналы LCD-монитора или CMYK-сигналы принтера.

Разумеется, нет никакой необходимости в фактической конверсии изображений через аппаратно-независимое цветовое пространство: вместо нее (дабы повысить вычислительную эффективность и минимизировать ошибки квантования) строится лишь программная схема сквозного преобразования от одного устройства через аппаратно-независимое пространство ко второму устройству.

Описанный выше принцип позволяет стимулам оригинального изображения быть точно воспроизведенными (по их CIE-трехстимульным значениям) на любом выводном устройстве, что, как мы видим, сходно с хантовским определением колориметрического цветовоспроизведения.

Для получения колориметрически точной цветовой репродукции инструментарий и методы колориметрических калибровки и характеризации входных и выводных устройств должны быть легко доступными, но, хотя сегодня рынок и предлагает широкий выбор приборов и методик, спрос на колориметрическое цветовоспроизведение среди обычных пользователей весьма низок: к сожалению, уровень притязаний большинства сводится к банальному произвольному цветовоспроизведению. Вместе с тем, несмотря на сегодняшнюю конъюнктуру, колориметрическое цветовоспроизведение должно наконец стать широко востребованным.

Колориметрическое цветовоспроизведение оправданно только тогда, когда условия просмотра оригинала и его репродукции идентичны, поскольку в этом случае трехстимульные соответствия эквивалентны соответствиям по восприятию. Когда условия просмотра различны (то есть в подавляющем большинстве случаев), мы должны перейти на следующий уровень — уровень цветовоспроизведения по восприятию.

4. Цветовоспроизведение по восприятию

Цветовоспроизведение по восприятию (color appearance reproduction) требует наличия четкой колориметрической калибровки и точной колориметрической характеризации всех устройств, информации об условиях просмотра оригиналов и репродукций и участия в репродукционном процессе модели цветового восприятия.

При цветовоспроизведении по восприятию трехстимульные значения с учетом данных об условиях просмотра оригинального изображения (белая точка, фотометрическая яркость, окружение и пр.) преобразовываются в корреляты восприятия (светлоту, насыщенность и цветовой тон). Затем данные о новых условиях просмотра используются для преобразования коррелятов восприятия в согласованные трехстимульные значения (необходимые выводному устройству).

Цветовоспроизведение по восприятию позволяет учесть широкий диапазон носителей и условий просмотра, и можно говорить, что данный вид цветовоспроизведения аналогичен хантовскому эквивалентному цветовоспроизведению по светлоте/насыщенности. Отметим, что цветовоспроизведение по восприятию все еще остается сугубо коммерческим и чаще всего не востребовано обычными пользователями. Однако даже когда воспроизведение по цветовому восприятию станет повсеместным, останутся пользователи, которым будет требоваться не четкое соответствие репродукции оригиналу, но нечто иное, что лежит в области т.н. приоритетного цветовоспроизведения.

5. Приоритетное цветовоспроизведение

Приоритетное цветовоспроизведение (color preference reproduction) — это целенаправленная манипуляция цветовыми стимулами репродукции с целью получения результатов, предпочитаемых заказчиком (а не достижения соответствия по восприятию), то есть задачей приоритетного цветовоспроизведения является получение (на данном носителе) возможно лучшей репродукции того или иного элемента изображения.

Приоритетное цветовоспроизведение аналогично хантовскому выделенному цветовоспроизведению.

* * *

Отметим, что *в открытых системах* достижение того или иного уровня воспроизведения требует обязательной способности системы работать на более низких уровнях. Таким образом, полный комплект уровней цветовоспроизведения требует от системы визуализации следующего:

— способности воспроизводить цветовые стимулы;

— способности визуально-комфортно воспроизводить цветовые стимулы;

— обеспечения равенства оригинала и репродукции по трехстимульным значениям;

— обеспечения равенства по атрибутам восприятия;

— «умения» манипулировать атрибутами восприятия для «улучшения» результата.

В закрытых системах нет технологической необходимости обеспечения всех пяти уровней: движение данных заведомо определено и контролируется на протяжении всего процесса. К примеру, в цветной фотографии все технологические параметры (чувствительность пленок, химический состав красок, процедуры обработки и методы печати) строго заданы, благодаря чему можно разработать фотопленку, предназначенную для реализации, например, визуально-комфортного или выделенного цветовоспроизведений, но — без способности к колориметрическому цветовоспроизведению или воспроизведению по цветовому восприятию (поскольку, как уже было сказано, стадии обработки и печати строго регламентированы). Аналогичные системы действуют в цветном телевидении, где все технологические параметры (чувствительность камер, обработка сигнала и настройки выводных устройств) стандартны.

В открытых системах имеет место огромное число возможных вариантов устройств ввода, обработки, отображения и вывода, которые комбинируются для совместной работы. Производитель каждой из подсистем не в состоянии предвидеть все возможные комбинации аппаратов, к которым будет подсоединено его устройство. Таким образом, единственно возможным решением является подключение к системе таких устройств, которые способны работать на всех пяти возможных уровнях цветовоспроизведения и эстафетно передавать колориметрические данные или данные о цветовом восприятии (либо информацию для их получения) от одного устройства к другому, то есть — реализовывать процесс аппаратно-независимого цветовоспроизведения.

19.4 ОБЩАЯ СХЕМА

На рис. 19.1 дана общая схема процесса аппаратно-независимого цветовоспроизведения: наверху — оригинальное изображение, представленное неким устройством ввода (отметим, что «ввод» может исходить и от устройства отображения, например, CRT-дисплея).

Колориметрическая характеризация устройства ввода позволяет выполнить преобразование аппаратных координат (например, RGB) в колориметрические координаты (такие, как CIE XYZ или CIELAB), которые принадлежат т.н. аппаратно-независимому цветовому пространству (device-independent color space), т.е. пространству, в котором колориметрические координаты не зависят от какого-либо специфического устройства цветовоспроизведения.

Следующий этап: учет информации об условиях просмотра оригинального изображения и применение к колориметрическим данным процедуры учета смены хроматической адаптации и/или модели цветового восприятия. Последнее выполняется с целью преобразования XYZ-значений в размерности, коррелирующие с атрибутами восприятия (светлотой, цветовым тоном и насыщенностью).

По выполнении такого преобразования цветовые координаты отражают влияние на восприятие специфики устройства и условий просмотра, то есть

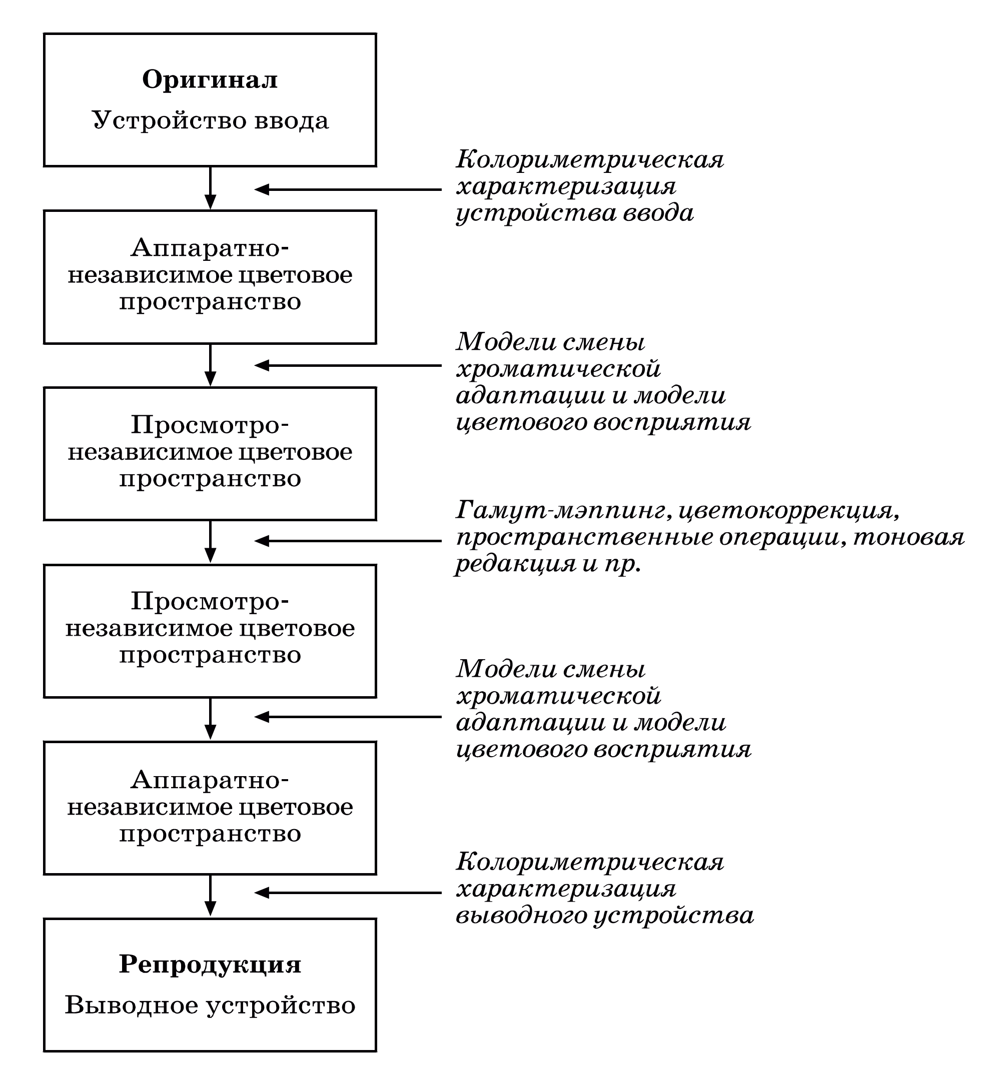


Рис. 19.1 Концептуальная поточная диаграмма процесса аппаратно-независимого цветовоспроизведения.

они принадлежат т.н. *просмотро-независимому пространству* (viewing-conditions-independent space). На данной стадии процесса изображение описывается исключительно его изначальным восприятием, и эта стадия более всего подходит для манипуляции цветами изображения (если в таковых есть необходимость). Манипуляции эти могут представлять собой компрессию охвата (гамут-мэппинг), цветокоррекцию, управление тонопередачей, пространственные операции, подавление шумов и пр. Отметим, что на данном этапе атрибуты цветового восприятия элементов изображения принимают свои окончательные значения.

Далее начинается обратный процесс (кстати говоря, демонстрирующий удобство и эффективность аналитически инвертируемых моделей цветового восприятия): условия просмотра выходного изображения (наряду с окончательными данными о его восприятии) используются для инверсии модели цветового восприятия с целью обратного преобразования от просмотро-независимого пространства к пространству аппаратно-независимому, например, про-

странству CIE *XYZ*-значений. Последние на основе данных колориметрической характеризации выводного устройства преобразовываются в аппаратные координаты (например, CMYK), необходимые для воспроизводства стимулов желаемого выходного изображения. Следующие разделы текущей главы детализируют данный процесс.

Отметим, что программная реализация процессов аппаратно-независимого цветовоспроизведения требует больших вычислительных ресурсов, поэтому во избежание серьезных ошибок квантования обработка изображений в промежуточных пространствах цветового восприятия выполняется обычно по т.н. данным с плавающей запятой (floating-point image data) и при той же точности вычислений. Такой подход вполне пригоден для научных исследований, но непрактичен в отношении большинства «бытовых» систем цветовоспроизведения, в частности тех, что ограничены 24-битовым (8 бит на канал) представлением цветовых данных: в этих случаях описанные выше процессы, хоть и используют для конструирования систем и алгоритмов, но самое исполнение возлагают на интерполяцию в рамках многомерных восьмибитовых (на канал) таблиц соответствия (look-up tables — LUTs).

Любопытно, что в отличие от полиграфии отрасль компьютерной графики чаще всего работает по данным с плавающей запятой и высокоточными целыми. Есть вероятность, что в результате слияния двух отраслей исторически сложившиеся вычислительные проблемы и ограничения будут преодолены.

19.5 КАЛИБРОВКА И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВ

Калибровка — это приведение устройства визуализации к заданному состоянию, например, в случае CRT-мониторов, к определенной белой точке, определенным усилению и смещению (bias) или же точным взаимоотношениям между оптическими плотностями колорантов и управляющими сигналами принтера. Калибровка гарантирует, что цветовоспроизводящая система изо дня в день и от аппарата к аппарату, будет выдавать стабильные результаты. Однако калибровка может быть выполнена при полном отсутствии информации о взаимоотношениях между аппаратными и колориметрическими координатами, в то время как колориметрическая характеризация устройства требует обязательного наличия такой информации.

Калибровка устройства — это скорее задача производителя, нежели пользователя (решение которой в основном зависит от технологии производства). Таким образом, калибровку мы более обсуждать не будем и лишь подчеркнем ее важность: если стабильные результаты необходимы изо дня в день и/или от устройства к устройству, то необходима регулярная и частая калибровка.

Характеризация устройства — это процесс диагностики и протоколирования взаимоотношений между аппаратными координатами и аппаратно-независимым цветовым пространством (первый шаг на рис. 19.1).

Между калибровкой и характеризацией существует некий компромисс: если регулярная калибровка невозможна, то желаемая точность репродуцирования может быть достигнута за счет частой характеризации. Если же имеется

техническая возможность выполнения отличной калибровки, то на весь период регулярных калибровок можно ограничиться единожды выполненной характеризацией.

Три подхода к характеризации устройств

Существует три принципиальных подхода к характеризации устройств:

1. Физическое моделирование.
2. Эмпирическое моделирование.
3. Полное измерение.

Разумеется, существуют процедуры, комбинирующие перечисленные методы.

В большинстве случаев исходом характеризации является построение трехмерной таблицы соответствий (LUT), используемой для связи с процедурой интерполяции (которая, в свою очередь, предназначена для обработки гигантских массивов данных).

Характеризация путем физического моделирования

Характеризация устройств визуализации путем физического моделирования осуществляется через построение аналитических моделей, связывающих колориметрические координаты элементов входного (или выходного) изображения с сигналами, выдаваемыми входным устройством или сигналами, управляющими выходным устройством. Физические модели характеризации могут быть построены для цветовоспроизводящих устройств всех типов и всех уровней сложности.

Физическая модель характеризации *сканера* содержит первичную стадию линеаризации аппаратных сигналов по отношению к фотометрической яркости стимулов (или к коэффициенту поглощения поверхности) и завершающую стадию, на которой выполняется преобразование аппаратных координат в CIE-трехстимульные значения. Плюс к тому, иногда требуются данные о физических свойствах сканируемых материалов (зависит от устройства сканера). Отметим, что перечисленных хлопот можно было бы избежать, если бы сканеры конструировались как колориметры, а не как устройства с произвольными *RGB*-чувствительностями.

Физическая модель характеризации *CRT-дисплея* задействует нелинейное преобразование управляющих потенциалов в технически согласованные яркости RGB-люминофоров с их последующим линейным преобразованием в трехстимульные значения CIE XYZ.

Физическая модель характеризации *выводного печатающего устройства* (hard-copy output device) требует преобразования управляющих сигналов в показатели концентрации красителей, пигментов или чернил, с последующей обработкой последних т.н. моделью краскосмешения (color mixing model), необходимой для прогноза спектральных коэффициентов отражения (СКО) или пропускания (СКП) закрашенных поверхностей. СКО или СКП поверхностей,

в свою очередь, могут быть использованы для вычисления трехстимульных значений CIE XYZ.

Преимущество физических моделей характеризации заключается в том, что они устойчивы, не требуют большого числа колориметрических измерений и позволяют легко «перехарактеризовать» устройство, если изменен какой-то из его компонентов.

Недостаток физических моделей состоит в том, что, во-первых, их довольно сложно построить; во-вторых — еще сложнее ими управлять. Отметим также, что физические модели наиболее часто используются для характеризации CRT-дисплеев.

Характеризация путем эмпирического моделирования

Характеризация путем эмпирического моделирования требует сбора большого числа данных с последующей статистической подгонкой взаимоотношений аппаратных координат с координатами колориметрическими. Такие модели обычно используются для непосредственного преобразования аппаратных данных в CIELAB-координаты, дабы избежать трудностей дискретизации CIE XYZ-значений.

Эмпирические модели характеризации часто представляют собой многомерные полиномы n-порядка или, альтернативно, модели нейронных сетей высокой сложности. Эмпирические модели требуют меньшего числа измерений, чем LUT-методы, но большего, чем физические модели.

Эмпирические модели характеризации зачастую плохо работают в приграничных и граничных областях цветовых охватов устройств, выдавая весьма большую систематическую ошибку. Поскольку эмпирические модели не имеют отношения к физике устройств визуализации, их приходится перестраивать всякий раз, как только меняется какой-либо компонент системы.

Эмпирические модели чаще всего используются для характеризации сканеров.

Характеризация путем полного измерения

Третьим подходом к характеризации устройств является полное измерение всех выходных характеристик устройства, необходимое для т.н. репрезентативной выборки его цветового охвата (для характеризации сканера используются сигналы по большому числу заранее известных входных стимулов). Обычно выводится и колориметрически измеряется некая карта с выборкой аппаратных сигналов 9×9×9 (то есть в сумме 729 измерений). Отметим, что для характеризации устройств со слабой повторяемостью внутри тиража (то есть, от изображения к изображению) или от аппарата к аппарату может понадобиться много большее число измерений.

Массив колориметрических данных в дальнейшем должен быть нелинейно интерполирован с целью заполнения высокоплотной (например, 33×33×33) таблицы соответствий (LUT), которую можно использовать для обработки данных изображения посредством многомерной интерполяции.

Недостатками метода (помимо необходимости выполнения большого числа измерений) являются:

— трудность интерполяции сильно нелинейных данных;

— необходимость возврата к полной процедуре характеризации, когда меняется какой-либо из параметров устройства;

— трудность в построении обратной схемы действий (которая необходима в большинстве случаев).

Преимуществом характеризации путем полного измерения (которое делает ее весьма популярной) является то, что она не требует полноты информации о физических свойствах устройств.

Характеризация путем полного измерения и методы LUT-интерполяции чаще всего используются для характеризации принтеров.

Виды колориметрических измерений

Для характеризации цветовоспроизводящих устройств требуются колориметрические измерения различных видов.

Характеризация CRT- или LCD-мониторов требует спектрорадиометрических или колориметрических измерений цветности люминофоров (данные о которой необходимы для выполнения $RGB \rightarrow XYZ$-преобразования), а также относительных радиометрических или фотометрических измерений, необходимых для получения функций нелинейной передачи (nonlinear transfer functions) по каждому каналу.

В 1993 г. Бернс и колл. детально описали схему колориметрических измерений и характеризации CRT-мониторов, а в 1996 г. Бернс дал краткий обзор практической процедуры их калибровки и характеризации. Позднее, в 2003 г., он опубликовал детальное описание техники измерений и методов характеризации LCD-мониторов.

Принтеры и прочие выводные устройства для характеризации своих аппаратных колорантов и получения их колориметрических координат при различных осветителях и источниках требуют спектрофотометрических измерений спектрального коэффициента отражения или пропускания, а для характеризации функций тонопередачи этих устройств могут понадобиться дополнительные денситометрические измерения.[1]

Проблемы колориметрической характеризации бинарных (полутоновых монохромных) и многоуровневых (полутоновых полноцветных) устройств отображения в свое время обсуждались различными авторами, в частности: Ярвисом (1976), Энгельдрумом (1986), Гентилем и колл. (1990), Роллестоном и Баласубраманианом (1993), Бернсом (1993), Ханейши и колл. (1996).

Характеризация сканеров и цифровых фотокамер требует спектрорадиометрической оценки спектральной чувствительности каналов или же эмпирического определения этих чувствительностей. В совокупности со спектрора-

[1] В денситометрических измерениях, как правило, не возникает необходимости, поскольку все денситометрические показатели могут быть рассчитаны на основании спектрометрических данных. — *Прим. пер.*

диометрической оценкой и характеризацией линейности датчиковой системы необходимы также спектрорадиометрические данные об осветительной системе устройства. Отметим, что часто по хорошо характеризованным мишеням (и полученным с них данным сканера) удается весьма точно определить взаимоотношения между аппаратными сигналами сканера и колориметрическими координатами.

Колориметрическая калибровка и характеризация устройств ввода описаны Хангом (1991), Кангом (1992), Энгельдрумом (1993), Родригесом и Стокхэмом (1993), а также Бернсом и Шиу (1995).

Блик, метамеризм осветителя и флуоресценция

При характеризации устройств часто возникают три дополнительных проблемы, относящиеся к колориметрическим измерениям: блик, метамеризм осветителя и флуоресценция. Перечисленным эффектам порой не придают особого значения, но все-таки они требуют отдельного обсуждения.

Блик

Спектрофотометрические и колориметрические измерения, необходимые для характеризации устройств, обычно выполняются при помощи специализированного инструментария и специально подготовленных образцов. Такие измерения не делаются при фактической просмотровой ситуации, поскольку любые фактические просмотровые условия содержат блики. Однако же спектральное распределение и уровень блика должны быть измерены и добавлены к любой реальной колориметрической характеристике устройств цветовоспроизведения.

Поскольку блик — это аддитивная смесь света, отраженного от изображения, мы говорим о нем как о простой добавке трехстимульных значений блика к трехстимульным значениям элементов изображения. Такая добавка может потребовать пересчета белой точки изображения и перенормировки данных. В некоторых случаях блик может зависеть от самоего изображения, и тогда требуются более серьезные измерения и расчеты. Несмотря на сказанное выше, измерения цветовых стимулов изображения все же могут быть выполнены in situ[1] с использованием т.н. телеспектрорадиометра, учитывающего блики просмотрового оборудования.

Метамеризм осветителя

Метамеризм осветителя создает определенные сложности в работе устройств ввода и вывода.

Для устройств ввода метамеризм осветителя, комбинированный с неколориметрическими чувствительностями датчиков, может разрушить все надежды на получение колориметрически достоверной репродукции.

Для контроля метамеризма осветителя на выходном конце репродукцион-

---

1 In situ — прямо на месте (*лат.*). — *Прим. пер.*

ной цепочки необходимо характеризовать устройства с использованием функций спектрального коэффициента отражения (или пропускания), полученных с учетом фактического спектрального распределения энергии источника освещения (дабы в дальнейшем рассчитывать колориметрические координаты). Выполнять процедуру следует с высокой точностью, даже при использовании стандартизированных осветителей, так как, к примеру, координаты цветовых ощущений, возникающих при свете D50-имитатора, могут радикально отличаться от цветовых координат, вычисленных с использованием стандартного CIE D50-осветителя.

Флуоресценция

Флуоресценция — серьезная проблема в деле цветовоспроизведения, поскольку многие поверхности (к примеру, большинство бумаг) и многие пигменты, краски и чернила — флуоресцентны.

Колориметрия флуоресцентных материалов — это очень серьезный вопрос, поскольку энергия, испускаемая флуоресцирующей поверхностью, — это функция от световой энергии, падающей на поверхность. Следовательно, источник освещения, используемый для спектрофотометрии обычных нефлуоресцентных материалов, не может быть использован для вычисления колориметрических координат: необходимая точность расчетов может быть обеспечена только при измерении флуоресцентных материалов с использованием источника, максимально близко воспроизводящего спектр осветителя. Лучшим практическим решением является измерение флуоресцентных материалов в конечных условиях их просмотра, выполняемое при помощи телеспектрорадиометра.

В 1980 г. Грум и Бартлесон дали великолепный обзор колориметрии флуоресцентных поверхностей, а Гонзалес и Фершильд (2000) доложили об исследовании влияния флуоресценции на колориметрию типичных печатных материалов.

Многомерная LUT-интерполяция

Какой бы способ характеризации устройства визуализации ни был выбран — конечным практическим результатом обычно является построение многомерной LUT. Без LUT пришлось бы пройти ряд уровней нелинейных преобразований и конверсий цветовых пространств, требующих гораздо большей точности вычислений, чем заложенные в большинство устройств цветовоспроизведения 8-бит на канал. Поскольку такие преобразования и конверсии очень сильно тормозят работу типичных настольных систем визуализации, многомерная LUT-интерполяция — это инструмент быстрого, удобного и эффективного цепного (end-to-end) преобразования. Конструкция многомерных LUT и их использование посредством интерполяции описаны Хангом (1993) и Кассоном (1993, 1995).

Многомерная LUT-интерполяция выполняется различными способами, и реализуется, в частности, такими программами, как Adobe Photoshop (и дру-

гими CMS-приложениями, использующими LUT-метод для преобразования цветовых пространств). Многомерные LUT в форме т.н. словарей цветопередачи внедрены также в язык описания страниц PostScript Level 2 (Adobe Systems Incorporated, 1990).

Еще одной хорошо известной открытой системой, создающей базис для характеризации устройств посредством многомерных LUT, являются профайлы ICC-формата (International Color Consortium, 1995), обеспечивающие международный межплатформенный стандарт для CMS различных уровней.

19.6 ПОТРЕБНОСТЬ В МОДЕЛЯХ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

Схема аппаратно-независимого цветовоспроизведения, показанная на рис. 19.1, наглядно демонстрирует необходимость использования моделей цветового восприятия. Отметим, что существует по крайней мере два мотива применения моделей: для редактирования изображений и для выполнения преобразований между условиями просмотра.

Манипуляции с изображениями, такие, как приоритетное цветовоспроизведение и гамут-мэппинг, лучше всего выполнять в перцепционно-значимых размерностях (к примеру, светлоте, насыщенности и цветовом тоне). Понятно и то, что преобразование колориметрических координат из одного набора условий просмотра (белая точка, фотометрическая яркость, окружение, носитель и пр.) во второй набор также требует использования модели цветового восприятия.

Единственный путь уйти от использования модели цветового восприятия в аппаратно-независимом цветовоспроизведении — это описать и строго зафиксировать набор правил: репродукция оригинала должна быть выполнена по принципу колориметрического цветовоспроизведения, на том же носителе, рассматриваться в идентичных условиях просмотра и иметь такой же цветовой охват. В столь жестких условиях колориметрическое цветовоспроизведение и цветовоспроизведение по восприятию идентичны, но ясно, что требования, описанные выше, конечно же, чересчур строги (если не считать каких-либо исключительных репродукционных ситуаций). Таким образом, участие моделей цветового восприятия в деле аппаратно-независимого цветовоспроизведения неизбежно, если с помощью открытой системы мы хотим получить высококачественные, надежные результаты.

19.7 УСЛОВИЯ ПРОСМОТРА

Единственной нерешенной проблемой в вопросе подключения модели цветового восприятия к процессу аппаратно-независимого цветовоспроизведения являются определение и контроль условий просмотра. Даже совершенной модели цветового восприятия грош цена, если фактические условия просмотра не идентичны тем, по которым модель выполняла расчеты (наличие метамеризма между CIE-осветителем и его физическим имитатором — наипервейший пример данной проблемы).

Часть сложностей, возникающих при контроле условий просмотра, относится к определению полей зрения. В свое время Хант выполнил огромную работу по классификации их различных компонентов (Хант, 1991), однако даже с хантовским расширенным определением поля зрения трудно понять, какую именно долю сложного изображения (демонстрируемого в типичных условиях просмотра) следует считать проксимальным полем, какую фоном и какую — окружением. К примеру: что считать фоном? — область, непосредственно прилегающую к краям изображения, или области, непосредственно прилегающие к отдельным элементам изображения? Второе определение, вероятно, точнее, но расчет в этом случае требует радикально более сложных вычислений (что зачастую непрактично). Однако, кроме точного определения специфических аспектов условий просмотра, важно, чтобы четко была соблюдена последовательность обработки изображения (на всех этапах), дабы избежать потенциальных отклонений из-за одного только факта участия в деле модели цветового восприятия.

Итак, практически оправданным определением фона является следующее определение: фон — это область, непосредственно прилегающая к краям изображения; окружением же считается вся оставшаяся область поля зрения. Отметим, что данное определение фона отлично от хантовского (см. гл. 7).

Следует сказать, что в определении проксимального поля (в контексте проблемы воспроизведения изображений) нет необходимости, поскольку пространственные взаимоотношения между различными элементами оригинала и репродукции неизменны: проксимальное поле становится важным фактором в тех случаях, когда хотят воспроизвести цветовое восприятие элемента изображения в полностью самостоятельном контексте (например, цвета логотипов, торговых марок и проч.).

Однако даже при наличии строгого определения различных компонентов поля зрения **самым важным в деле аппаратно-независимого цветовоспроизведения является постоянный тщательный контроль условий просмотра.** Если пользователи не желают скрупулезно следить за условиями просмотра, они должны быть готовы к полной непредсказуемости результатов цветорепродукционного процесса.

Параметры условий просмотра, за которыми необходимо следить со всей тщательностью, таковы:

1. Спектральное распределение энергии источника освещения.
2. Уровень фотометрической яркости.
3. Относительная фотометрическая яркость и цветность окружения.
4. Относительная фотометрическая яркость и цветность фона.
5. Блики на изображении (если не учтены при характеризации устройства).
6. Размер изображения и расстояние просмотра (пространственный угол).
7. Геометрия просмотра.

Плюс к тому наблюдатели должны выносить окончательное суждение об изображениях только по прошествии времени, достаточного для полной адаптации к соответствующим условиям просмотра.

В 1996 г. Браун наглядно продемонстрировал важность контроля условий просмотра при сравнении изображений, выполненных на разных носителях:

ученый пришел к заключению, что для вынесения окончательного суждения наилучшей является методика последовательного бинокулярного просмотра (successive binocular viewing), при которой наблюдатель обоими глазами смотрит на первое изображение, а затем, после минутной переадаптации к новым условиям просмотра, смотрит на изображение сравнения. Пространственное расположение оригинала и репродукции должно быть таким, чтобы в каждый данный момент было видно только одно изображение, и, отметим, что всякий раз, когда наблюдатель переходит от одного изображения к другому, требуется одна минута адаптации.

К сожалению, в большинстве случаев используется методика одновременного бинокулярного просмотра (simultaneous binocular viewing), при которой оригинал и репродукция (с разными белыми точками и на разных носителях) рассматриваются одновременно, край в край, что в итоге дает неприемлемые результаты. В таких ситуациях статус хроматической адаптации наблюдателя не может быть достоверно спрогнозирован, поскольку зависит от относительной величины времени, потраченного на рассматривание каждого изображения.

При одновременном просмотре оптимальные результаты могут быть получены, если предположить некую единую, промежуточную точку адаптации. Действительно, результатом такого выбора явится репродукция, которая будет соответствовать оригиналу при рассматривании с ним край в край, но при самостоятельном просмотре покажется весьма странной, к примеру, если CRT-монитор имеет 9300 К по белой точке, а репродукционный отпечаток предназначен для рассматривания при свете D50-имитатора, то оттиск, обеспечивающий равенство при одновременном просмотре, будет иметь общий синий сдвиг (blue cast). Как только такой отпечаток станут рассматривать изолированно (но по-прежнему при свете D50-имитатора), он будет восприниматься неприемлемо синим, то есть наблюдатель зафиксирует полное несоответствие. Когда же при условии последовательной адаптации используется метод последовательного сравнения, то изображение на экране (идеально сбалансированном по серому при коррелированной цветовой температуре белой точки 9300 К) будет совпадать с нейтрально-сбалансированным отпечатком при D50-имитаторе. Таким образом, при соблюдении соответствующих просмотровых процедур можно получить как соответствие по цветовому восприятию, так и высокое индивидуальное качество изображения.

Вопросы одновременного сравнения изображений, выполненных на разных носителях, детально изложил Като (1995).

Когда условия просмотра четко определены и контролируемы, тогда путем разумных и осторожных предвычислений можно извлечь кое-какую общевычислительную выгоду. Предвычисления делят работу моделей цветового восприятия на процедурные составляющие — разбивают процесс на те участки, где требуются однократные вычисления (то есть по двум вариантам условий просмотра), и те, что требуют расчета по каждому элементу изображения. Таким образом, оптимальная предвычислительная процедура сперва рассчитывает просмотро-зависимые параметры модели, а затем полученный массив данных использует для индивидуальных вычислений по модели восприятия (выполняе-

мых в отношении каждого пиксела или элемента LUT). К примеру, если для учета изменений в белой точке и яркости (но при постоянном окружении) задействуется RLAB, то с целью определения трехстимульных значений репродукции изменение в условиях просмотра может быть предрассчитано с помощью единичного преобразования по 3×3-матрице, примененного к CIE *XYZ*-трехстимульным значениям оригинала. Сказанное является серьезным вычислительным упрощением, которое позволяет пользователям интерактивно менять параметры модели цветового восприятия, то есть оперативно выбирать источник, в свете которого будет рассматриваться данное изображение.

19.8 ПРОСМОТРО-НЕЗАВИСИМОЕ ЦВЕТОВОЕ ПРОСТРАНСТВО

Аппаратно-независимые цветовые пространства понимаются нами как пространства, представляющие CIE-характеристики цветового стимула, а не аппаратные сигналы того или иного специфического устройства (альтернативно: аппаратно-независимое цветовое пространство может быть позиционировано путем преобразования CIE-координат в координаты какого-либо абстрактного стандартного RGB-устройства [Андерсон и колл., 1996]).

Внедрение моделей цветового восприятия в репродукционный процесс (рис. 19.1) позиционирует концепцию т.н. просмотро-независимого цветового пространства (viewing-conditions-independent color space), которая дополняет общую схему действий. Просмотро-независимые координаты расширяют CIE-колориметрию до масштабов описания цветового восприятия элементов изображения на уровне, не подверженном внешним ограничениям и кодирующем перцепционные корреляты элементов изображения (к примеру, их светлоту, насыщенность и цветовой тон). Данное представление облегчает работу рычагов волевого управления цветами изображения, — управления, необходимого для приоритетного цветовоспроизведения и гамут-мэппинга.

Стоит также отметить, что условия просмотра как таковые могут определить т.н. «субъективный охват» изображения («perceptual gamut limits»), к примеру: светлота, насыщенность и цветовой тон отдельных элементов изображения, имеющие некоторые значения при высокой интенсивности освещения, принципиально не могут быть воспроизведены с теми же значениями при низкой освещенности. Иными словами, — всегда найдутся цветовые ощущения, которые невозможно воспроизвести в конкретных условиях просмотра. Отметим, что «субъективный охват» изображения никоим образом не может умалить ценность моделей цветового восприятия — он лишь указывает на необходимость их использования.

Любопытно, что концепция просмотро-независимого цветового пространства в чем-то созвучна с тезисами науки о мышлении: в 1991 г. Давыдов представил модель объектных цветов, которая на выходе кодирует их в обычной гуманитарной лексике, то бишь в словах, которыми мы в повседневности описываем цветовое восприятие. О таком представлении мы говорим как о высокоуровневой модели цветового восприятия, в которой цвет представлен с помощью наименова-

ний, употребляемых человеком, а не путем математического упрощения цветового восприятия до пяти необходимых атрибутов.

19.9 ГАМУТ-МЭППИНГ

Было бы ошибкой говорить, что все проблемы аппаратно-независимого цветовоспроизведения можно решить за счет работы надежной и точной модели цветового восприятия, бо даже при совершенной модели всегда будет оставаться проблема гамут-мэппинга. Создание эффективных алгоритмов автоматической спецификации цветового охвата и цветовой компрессии остается, пожалуй, самой важной нерешенной проблемой в вопросах цветовоспроизведения на разных носителях (Фершильд, 1994).

Цветовой охват устройства — это диапазон цветовых ощущений, вызываемых стимулами, которые могут быть этим устройством воспроизведены. Цветовой охват может быть представлен в некоем трех- или многомерном цветовом пространстве. Очень важно отметить, что цветовые охваты должны быть графически представляемы именно в трехмерном цветовом пространстве, тогда как попытки двухмерного представления (как, скажем, вычерчивание контура охвата на диаграмме цветностей) глубоко ошибочны.

Наиболее подходящим пространством для спецификации цветового охвата устройства является координатная система той или иной модели цветового восприятия, поскольку в этом случае влияние на охват изображения условий его просмотра будет представлено адекватно. К примеру, только полная модель цветового восприятия может продемонстрировать то, что цветовой охват принтера «съеживается» до нуля при падении освещенности.

В целом цветовой охват устройства должен быть представлен размерностями светлоты, насыщенности и цветового тона в рамках выбранной модели восприятия. Однако в ряде случаев более подойдет описание охвата в размерностях субъективной яркости, полноты цвета и цветового тона. Примером может служить проекционная или какая-либо иная система, чувствительная к внешней подсветке, при которой абсолютный уровень фотометрической яркости оказывает существенное влияние на субъективное качество цветного изображения.

На рис. 19.2 в различных проекциях показаны цветовые охваты двух устройств, отрисованные в цветовом пространстве CIELAB: сетчатая фигура демонстрирует цветовой охват типичного монитора с белой точкой на D50 и с SMPTE-люминофорами; сплошная фигура — охват типичного струйного принтера при CIE D50-осветителе. Отметим, что охват CRT-монитора превышает охват принтера в светах, в то время как охват принтера превышает охват CRT по некоторым теневым участкам.

Данное трехмерное представление цветовых охватов призвано устранить ряд заблуждений, в частности то, что охват CRT-мониторов существенно больше, чем охват большинства принтеров (рис. 19.2 демонстрирует участки, в которых охват принтера выходит за границы охвата CRT-монитора). Ошибочное представление о размерах цветовых охватов устройств — это чаще всего ре-

зультат оценки двухмерных проекций охватов на диаграмму цветностей, игнорирующих третью размерность цветового пространства (субъективную яркость либо светлоту).

Гамут-мэппинг — это процесс управления цветами изображения, стимулы которых могут быть воспроизведены данным устройством. К примеру, можно попытаться использовать CRT-монитор для воспроизведения стимула насыщенного голубого (cyan), имеющегося на отпечатке. Если CRT-дисплей не может воспроизвести желаемый стимул, то цвет данного элемента изображения должен быть смещен к соответствующему цвету внутри охвата монитора. Однако может возникнуть проблема и противоположного характера, когда устройство способно воспроизводить стимулы, дающие более насыщенные цвета, чем те, что могут быть представлены на оригинальном изображении. Если полный охват выходного устройства не востребован, пользователь может оказаться недовольным результатами, поскольку знает, что на самом деле устройство способно к воспроизведению стимулов большего цветового диапазона, следовательно, цветами изображения нужно управлять, дабы реализовать весь охват устройства.

Таким образом, о проблеме гамут-мэппинга можно говорить как о сжатии цветового охвата изображения в тех его областях, что лежат вне охвата устройства (гамут-компрессия — gamut compression) и о расширении охвата изображения в тех областях, которые лежат внутри охвата устройства, но не заполняют его полностью (гамут-экспансия — gamut expansion). Отметим, что грамотная гамут-экспансия требует полной спецификации охвата устройства-источника изображения, а также сложной вычислительной процедуры, зависящей от самого изображения (image-dependent processing). Таким образом, в ближайшее время не приходится ожидать полного решения проблемы автоматического гамут-мэппинга.

Сказанное выше, как мы видим, противоречит общераспространенному мнению, будто вся проблема гамут-мэппинга целиком сводится к проблеме цветовых компрессий. Мы видим также, что задача управления цветом в обратном направлении представляется не менее важной и не менее (если не более) сложной. Ясно, что модель цветового восприятия — это лучший участок для описания цветовых охватов и гамут-мэппинга, так как все манипуляции могут быть выполнены в перцепционно-значимых размерностях.

К сегодняшнему дню предложено множество методов гамут-мэппинга, но в целом еще только предстоит создать автоматический алгоритм, способный удовлетворить запросы большинства пользователей.

Читателю, вероятно, окажутся полезными тексты лекций Эванса и Ханта по цветной фотографии (Эванс, 1953; Хант, 1995), в которых показано, что оптимальные репродукции — это те репродукции, что сохраняют цветовой тон элементов оригинала, минимально масштабируют светлоту (с целью сохранить ее относительность и средний уровень, а также масштабируют насыщенность таким образом, что взаимоотношения между относительными насыщенностями различных элементов изображения остаются неизменными. Разумеется,

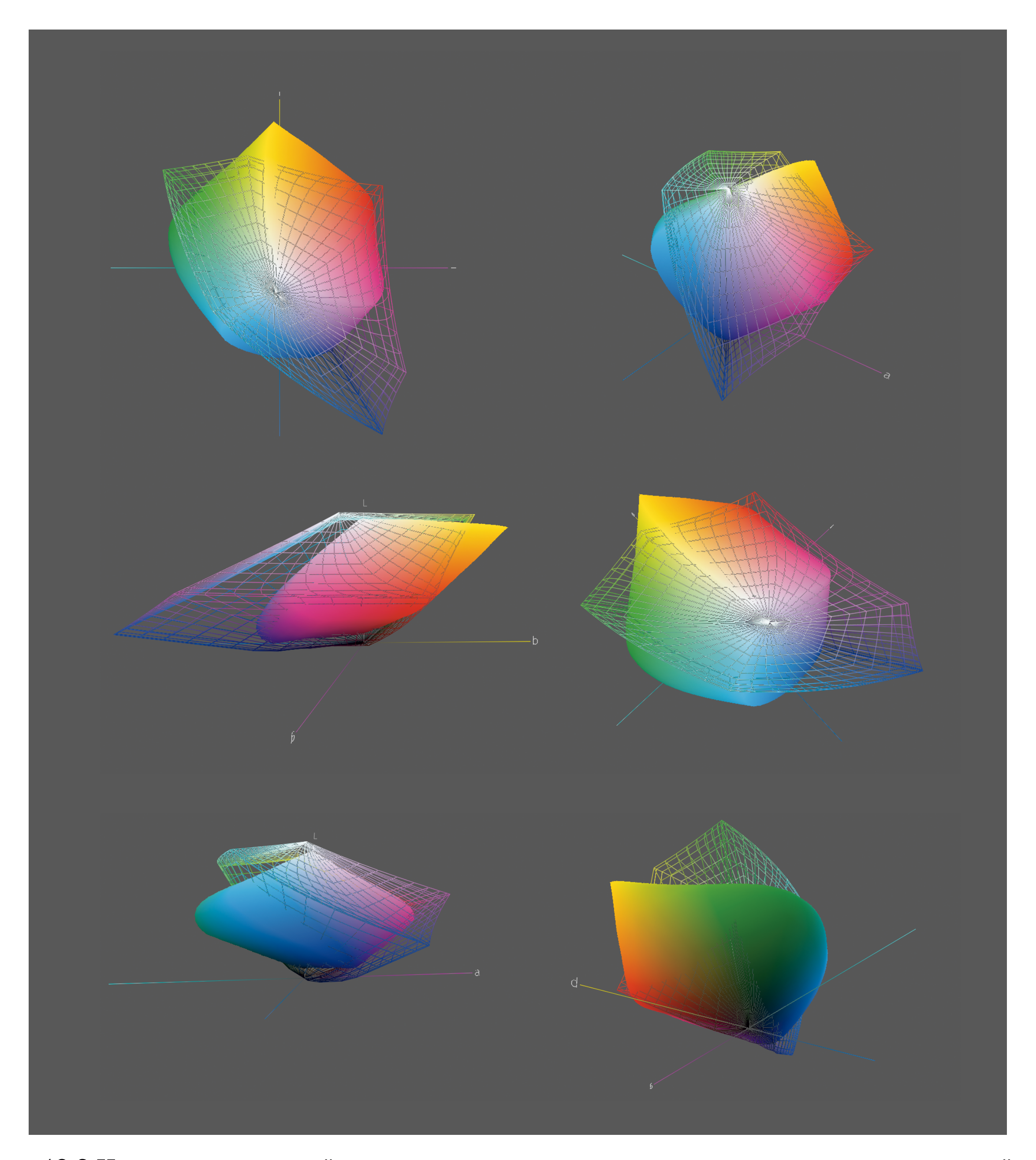


Рис. 19.2 Несколько проекций трехмерного представления цветовых охватов двух устройств в цветовом пространстве CIELAB. Сплошная фигура — охват типичного термотрансферного принтера. Сетчатая фигура — охват типичного CRT-дисплея.

все эти рекомендации игнорируются, когда речь идет о каких-либо специфических задачах цветовоспроизведения.

Описанные подходы и учет конкретных практических задач, при гамут-мэппинге обсуждаются на страницах работ Стоуна и колл. (1988), Гентиля и колл. (1990), Хошино и Бернса (1993), Вольского и колл. (1994), а также Монтага и колл. (1996, 1997).

Несмотря на то, что общего решения проблемы гамут-мэппинга пока не найдено, можно все-таки предложить его базовые концепции:

— для фотореалистичных изображений оправданным решением может явиться следующее: вначале выполняется линейное шкалирование светлот, обеспечивающее перцепционное соответствие белой и черной точек, а также неизменность средне-серой точки ($L^* = 50$); цветовой тон сохраняется, а насыщенность отсекается (clipping) на поверхность целевого охвата (компрессия) или же линейно расширяется до нее.

Упрощенным подходом является заурядный клиппинг внегамутных цветов на поверхность целевого охвата по минимальной дистанции (выполняется в перцепционно-равномерном цветовом пространстве) при одновременной отмене требования на постоянство цветового тона. Однако, такой подход является весьма упрощенным и не дает удовлетворительных результатов (Вольский и колл., 1994; Монтаг и колл., 1996, 1997, Браун и Фершильд, 1999);

— для изображений иных типов, таких, как бизнес-графика, более подходящими окажутся иные стратегии мэппинга: одной из них является приоритетное сохранение насыщенности стимулов, требуемое для сохранения эффектности бизнес-графики. При этом, если необходимо, идут на изменения в цветовом тоне.

Отличия в стратегиях гамут-мэппинга выводят на передний план важность понимания того, каковы конечные цели репродуцирования данного изображения, то есть стратегия мэппинга зависит от того, для чего предназначено данное изображение. Целевое отличие фотореалистичных изображений от бизнес-графики очевидно, однако даже для фотореалистичных изображений (в зависимости от их назначения) выбираются разные стратегии мэппинга. К примеру, наилучший вариант мэппинга для научных или медицинских изображений будет отличаться от варианта, пригодного для репродуцирования произведений живописи, который, в свою очередь, отличен от варианта, оптимального для бытовой моментальной фотографии (consumer snapshot).

19.10 ЦВЕТОВЫЕ ПРИОРИТЕТЫ

Когда проблемы прогнозирования цветового восприятия и гамут-мэппинга решены, остается последняя цветовая операция — мэппинг исходных цветов в направлении тех, что в данном конкретном случае приоритетны для наблюдателей. Следовательно, высокоточное цветовоспроизведение может являться лишь этапом цветорепродукционного процесса, но не его конечной целью.

Приоритетный мэппинг должен быть согласован с общим гамут-мэппингом, поскольку оба процесса, во-первых — осознанно искажают цветопередачу, во-вторых — влияют друг на друга. Аналогично гамут-мэппингу, приоритетный цветовой мэппинг зависит от намерений пользователя и/или от характера репродукционной задачи.

В ряде случаев, например в работе с научными и медицинскими изображениями, высокоточное цветовоспроизведение может явиться бескомпромиссной целью, тогда как при работе с фотореалистичными изображениями приоритетное репродуцирование цвета тех или иных объектов (к примеру, неба,

кожи, листвы) может сместить приоритеты копирования в направлении идеализированных памятных цветов.

При работе с абстрактными изображениями, такими, как бизнес-графика, приоритетное цветовоспроизведение может по большей части зависеть от возможностей устройства или же смысла самоего бизнес-документа, нежели от исходных цветов изображения.

Культурологические акценты приоритетного цветовоспроизведения

Дополнительным аспектом проблемы приоритетного цветовоспроизведения являются его культурологические акценты.

Системы приоритетного цветовоспроизведения, предназначенные для производственных сфер с разными культурологическими акцентами, обладают разными возможностями, и из опыта работы известно, что неучет данного обстоятельства неизбежно ведет к падению объема продаж цветовоспроизводящего оборудования.

Несмотря на то, что контроль социокультурных аспектов несомненно очень важен (хотя многие из них уже отошли в прошлое и имеют лишь историческую ценность), последние никак не оговорены документально и значимость их мало кем осознается. К примеру, некоторые пользователи отдают жесткое предпочтение цветорепродукционным особенностям той или иной системы лишь потому, что давно к ним привыкли, и любые отклонения от этих особенностей воспринимают отрицательно[1]. Такие пользовательские уклоны хоть и являются строго культурологическими, в целом давно известны, то есть: большинство (если не все) культурологические акценты приоритетного цветовоспроизведения так или иначе изучены и входят в состав фундаментального определения культуры как таковой.

Разговор о культурологических аспектах цветовоспроизведения безусловно интересен сам по себе и заслуживает дополнительного исследования, однако же Фернандес (2002), занимающийся данной проблемой, не отмечает на современном этапе наличия четкого культурологического деления по цветовым приоритетам: ученый показал, что ощутимо более выражены индивидуальные вариации, нежели средний разброс приоритетов по той или иной социо-культурной группе. За вариациями приоритетов (если таковые существуют, конечно) было бы весьма интересно понаблюдать и проследить их историческое развитие по мере прогресса в сферах коммуникации и взаимообмена визуальной информацией.

Концепция культурологической зависимости приоритетного цветовоспроизведения поднимает ряд интересных тем исследования, однако, как было отмечено, в вопросах приоритетного цветовоспроизведения ничуть не менее важ-

---

[1] Наглядным примером сказанного может служить приверженность многих фотографов к «классической фотохимической печати», объективные показатели которой на самом деле серьезно уступают таковым у струйной печати последнего поколения. — *Прим. пер.*

ны индивидуальные вариации: коль скоро последние могут усиливать существенные культурологические отличия в цветовых приоритетах, то столь же верным будет и то, что диапазон цветовых приоритетов данной субкультуры может выходить за рамки индивидуальных отличий (Фернандес, 2002). Проще говоря, достаточно лишь одной попытки воспроизвести изображение, призванное стать идеальным для двух разных наблюдателей, чтобы осознать масштаб отличий между индивидуальными приоритетами.

19.11 ОБРАТНЫЙ ПРОЦЕСС

Итак, на сей момент процесс цветовоспроизведения достиг середины поточной диаграммы на рис. 19.1. Как только обработка на данном уровне будет завершена, данные, представляющие цветовое восприятие в абстрактном пространстве, репродуцируются при помощи выводного устройства. На данном этапе процесс должен пойти в обратном направлении, то есть от просмотро-независимого цветового пространства к традиционному пространству аппаратных координат (а затем к собственно репродуцированному изображению). Сказанное свидетельствует о равновеликой важности прямого и обратного направлений репродукционного процесса для получения высококачественной копии оригинала.

Ясно, что для облегчения работы как самоя модель цветового восприятия, так и схемы аппаратной характеризации должны быть легко обратимы. Главное преимущество моделей цветового восприятия в том, что они позволяют пользователю манипулировать установками устройства визуализации или изменениями в условиях просмотра, но при этом не терять возможности при необходимости восстанавливать весь процесс и воспроизводить изображение с достаточной скоростью.

Если же использованная модель требует итеративной инверсии или же восстановления через полное измерение, то такая система может оказаться совершенно непрактичной.

19.12 ОБРАЗЦОВАЯ СИСТЕМА

Ранее мы говорили об общей идеологии аппаратно-независимого цветовоспроизведения, теперь же весьма полезным будет иллюстративный пример его результатов, полученных с помощью образцовой цветорепродукционной системы.

То, на что способны модели цветового восприятия, участвующие в аппаратно-независимом репродукционном процессе, последовательно иллюстрируют рис. 17.4–17.6, тогда как качество цветовоспроизведения, которое можно получить при тщательной характеризации устройств, в сравнении с качеством репродукций, полученных при помощи устройств некалиброванных и нехарактеризованных (то есть работающих, что называется, «прямо из коробки») — продемонстрирует нам рис. 19.3.

Образцовая система состоит из высококлассных настольных устройств вво-

да, обработки, отображения и печати изображений. Изображения на рис. 19.3 — это искусственно подобранные цветовые стимулы, имитирующие восприятие тех стимулов, что образуются на разных стадиях репродукционного аппаратно-независимого процесса.

В нашем примере в качестве оригинала взят фотоотпечаток карты Macbeth ColorCheker (Мак-Ками и колл., 1976), который показан в первом ряду рис. 19.3: изображение сканировано с разрешением 600 dpi на планшетном сканере и с разрядностью дискретизации 10 бит на канал.

Второй ряд рис. 19.3 демонстрирует идеальное условное отображение сканированного оригинала («безошибочная визуализация»). Изображение слева — это результат, полученный без колориметрической характеризации (только гамма-коррекция), в то время как изображение справа демонстрирует результат высокоточной характеризации по методу Бернса и Шиу (1995).

Следующий шаг задействует процесс отображения, реализуемый при помощи CRT-монитора с высоким разрешением (третий ряд рис. 19.3). Левое изображение — результат отображения при условии, что монитор и видеодрайвер установлены на гамма, номинальную для данной операционной системы (к примеру, 1.8 для Macintosh; 1.3–1.5 для Silicon Graphics; 2.2–2.5 для Windows). Предполагается также, что некое отклонение от номинальной белой точки не замечается благодаря хроматической адаптации. Изображение справа демонстрирует высокоточную визуализацию, полученную при помощи специфической характеризации системы отображения по методу Бернса (1996).

Отметим, что в работе системы, собранной из сканера и монитора, проявляют себя как недочеты сканирования, так и недочеты экранного показа (что видно на обоих изображениях).

Финальный этап демонстрации: печать изображения с разрешением 600 dpi на цветном лазерном принтере. Изображение слева представляет результат, полученный при использовании default-установок драйвера и PPD-файла (PostScript Printer Description). Изображение справа демонстрирует результаты, полученные благодаря трехмерной LUT, построенной на основании промеров тест-карты с выборкой охвата 9×9×9. Здесь мы вновь наблюдаем ошибки, накопившиеся в процессе работы некалиброванной и нехарактеризованной системы воспроизведения. Становится ясно, что тщательная колориметрическая характеризация всех трех устройств делает систему способной выдавать радикально лучшие результаты.

К сожалению, текущее состояние технологии не позволяет обычным пользователям подняться на уровень колориметрической точности цветовоспроизведения, однако потенциально такое все-таки возможно: описанная в следующем разделе т.н. ICC-система, создает рабочий базис для достижения колориметрического уровня точности цветовоспроизведения. Фактически, последнее, что осталось сделать на этом пути, — это добиться того, чтобы уже на этапе производства цветовоспроизводящие устройства подвергались точной калибровке и характеризации (и при этом работали стабильно), что позволит обычному пользователю не утруждать себя решением данной проблемы.

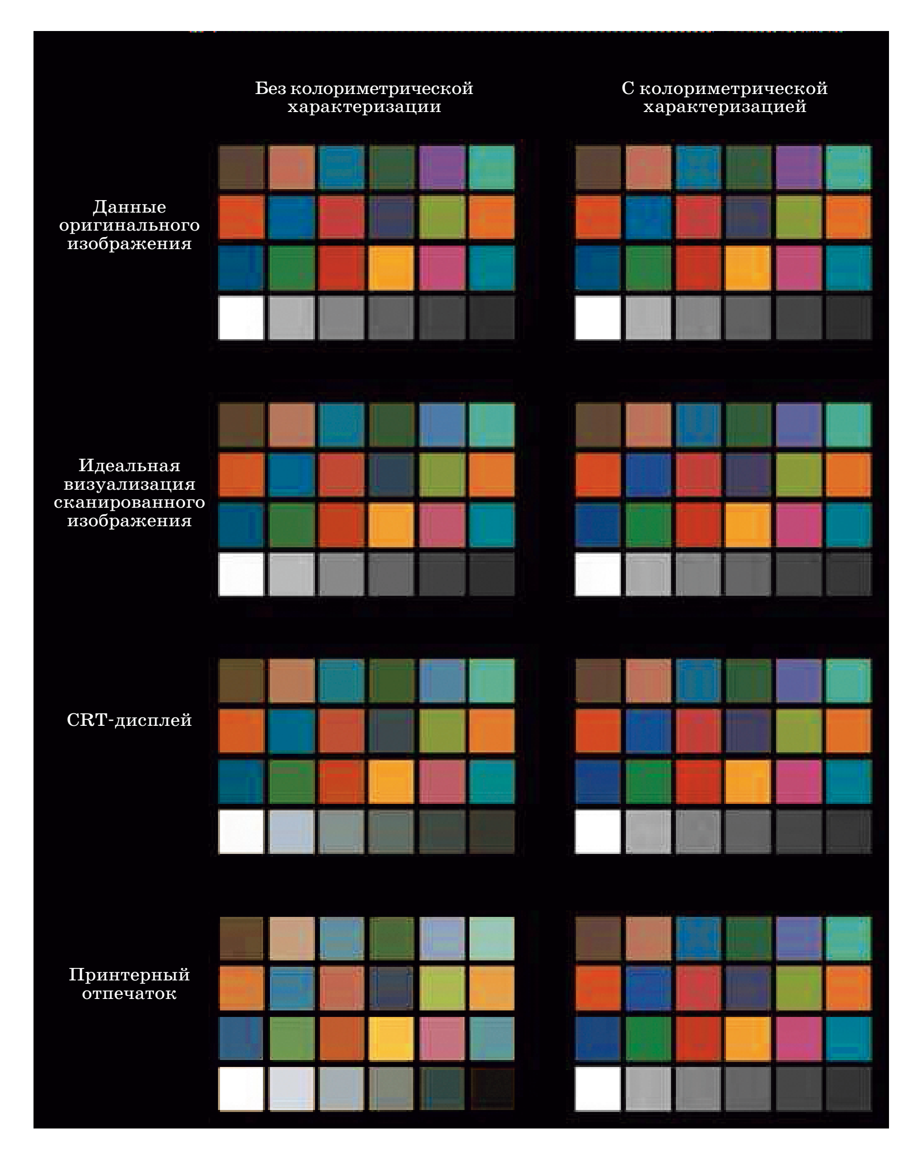


Рис. 19.3 Примеры точности цветовоспроизведения, выполняемого типичной настольной системой до и после колориметрических калибровки и характеризации.

19.13 ICC-СИСТЕМА

Международный консорциум по цвету (International Color Consortium, 1995) путем спецификации формата ICC-профайлов заложил основу универсальной системы реализации процессов аппаратно-независимого цветовоспроизведения (рис. 19.1). В консорциум вошли примерно 50 корпораций и организаций, имеющих прямое отношение к цветорепродукционному программному обеспечению, аппаратам и компьютерным операционным системам.

Формат профайлов — это спецификация структуры данных, которая может быть использована для описания результатов характеризации устройств, условий просмотра и цветопередачи. Профайлы могут быть использованы в связке с различными цветовоспроизводящими устройствами или присоединены

к цифровым изображениям с целью облегчения обмена информацией об их колориметрической «биографии».

Формат профайлов обеспечивает структуру обмена информацией таким образом, что их можно легко перемещать с компьютера на компьютер, из одной операционной среды в другую, от одной программы к другой. Поскольку ICC-профайлы поставляют данные, необходимые для реализации процесса аппаратно-независимого цветовоспроизведения, у разработчиков оборудования и программного обеспечения есть возможность разрабатывать программы эффективного использования данной информации с целью создания полноценных цветовоспроизводящих систем. Такое программное обеспечение именуется «*системой управления цветом*» (color management system — CMS), которая все более и более интегрируется в операционные среды компьютеров.

К профайлам предъявляется ряд серьезных требований, а именно: высокоточная характеризация различных устройств, расчет смены цветового восприятия, преобразования гамут-мэппинга, а также мэппинг по цветовым приоритетам.

Поскольку качество систем, основанных на ICC-профайлах, зависит как от возможностей CMS-программ, так и от самих профайлов, то в целом описание цветовоспроизводящей системы с помощью ICC-профайлов (при условии их добротного исполнения) закладывает основу для получения высококлассных результатов.

Структура и исполнение формата ICC, а также color management-приложений (и прочих совместимых с ними систем) непрерывно развиваются (www.color.org). Документы ICC, которые можно найти по указанной ссылке, содержат информацию о текущих разработках международных стандартов, относящихся к аппаратно-независимому цветовоспроизведению.

Пространство связи профайлов

Одной из важнейших концепций ICC-спецификации является т.н. *пространство связи профайлов* (profile connection space — PCS), суть которого для многих остается непонятной, так как точное определение и реализация PCS по-прежнему проблемны и активно обсуждаются внутри самого ICC. Следовательно, ниже мы должны упомянуть о самой последней на сегодня ICC-документации[1].

По сути, пространство связи профайлов определено неким конкретным набором параметров условий просмотра, позиционирующих т.н. *эталонные условия просмотра* (reference viewing conditions). Концепция PCS состоит в том, что профайл устройства ввода поставляет информацию, необходимую для преобразования аппаратных координат этого устройства в аппаратно-независимую цветовую спецификацию (CIE XYZ или CIELAB) или наоборот: из пространства связи профайлов в аппаратные координаты выводного устройства. Аппарат-

[1] На сегодня действует ICC-спецификация 4-го пересмотра (формат профайлов 4.2). Текст спецификации в русском переводе можно найти по адресу: http://shadrin.rudtp.ru/ISO-ICC/; файл: ICC-Specification-v42_RUS.pdf. — *Прим. пер.*

но-независимая цветовая спецификация несет в себе информацию о цветовом восприятии всех элементов оригинального изображения в условиях просмотра, прописанных в PCS. Однако сам метод, реализующий данное преобразование, до сих пор не утвержден.

Согласно оригинальному ICC-определению, PCS эталонные условия просмотра таковы:

Эталонный носитель: идеальный отпечаток с $D_{min} = 0$.[1]

Эталонное просмотровое оборудование: стандартная кабина ANSI PH2.30.

Окружение: среднее.

Освещение: CIE D50-осветитель.

Освещенность: 2200 ± 470 lux.

Колориметрия: идеальное безбликовое измерение.

Наблюдатель: Стандартный колориметрический двухградусный наблюдатель CIE 1931.

Геометрия измерения: не специфицирована.

В качестве примера использования ICC-профайлов в связке с PCS рассмотрим систему визуализации, состоящую из цифровой камеры (калиброванной на D65-освещение), CRT-монитора (с белой точкой на 9300 K) и принтера (с условием просмотра результатов при D50).

Профайл цифровой камеры на основании стандартной процедуры калибровки и характеризации должен поставлять информацию, необходимую для первого преобразования аппаратных координат камеры (скажем, RGB-данных) в CIE-трехстимульные значения при D65-осветителе. Трехстимульные значения элементов изображения, полученные при D65-осветителе (с учетом прочих значимых атрибутов условий регистрации стимулов сцены) должны быть преобразованы (с использованием той или иной модели цветового восприятия) в согласованные трехстимульные значения для условий просмотра PCS (осветитель D50 и пр.), то есть: в профайле устройства ввода должна содержаться вся информация, необходимая для выполнения преобразования аппаратных координат в согласованные трехстимульные значения для PCS.

CRT-монитор должен иметь выходной профайл, который должен нести информацию, необходимую для преобразования значений из PCS в согласованные трехстимульные значения для условий просмотра на CRT-мониторе (9300 K по белой точке, тусклое окружение и пр.) и последующего преобразования (на основании данных характеризации монитора) в RGB-аппаратные координаты, необходимые для экранного воспроизводства согласованных цветовых стимулов. Отметим, что профайлы устройств ввода и вывода могут быть объединены так, что RGB-данные камеры будут преобразовываться в RGB-дан-

---

[1] В последней редакции спецификации ICC-профайлов действует следующее определение эталонного носителя: «Эталонный носитель определен как гипотетический отпечаток, выполненный на подложке с нейтральным коэффициентом отражения 89%; самый темный участок отпечатка на данном носителе имеет нейтральный коэффициент отражения 0,30911%, что составляет 0,34731% коэффициента отражения подложки: соответственно это будут белая и черная точки эталонного носителя. **Примечание:** таким образом, линейный динамический диапазон эталонного носителя равен 287,9:1, а диапазон плотностей 2,4593». — *Прим. пер.*

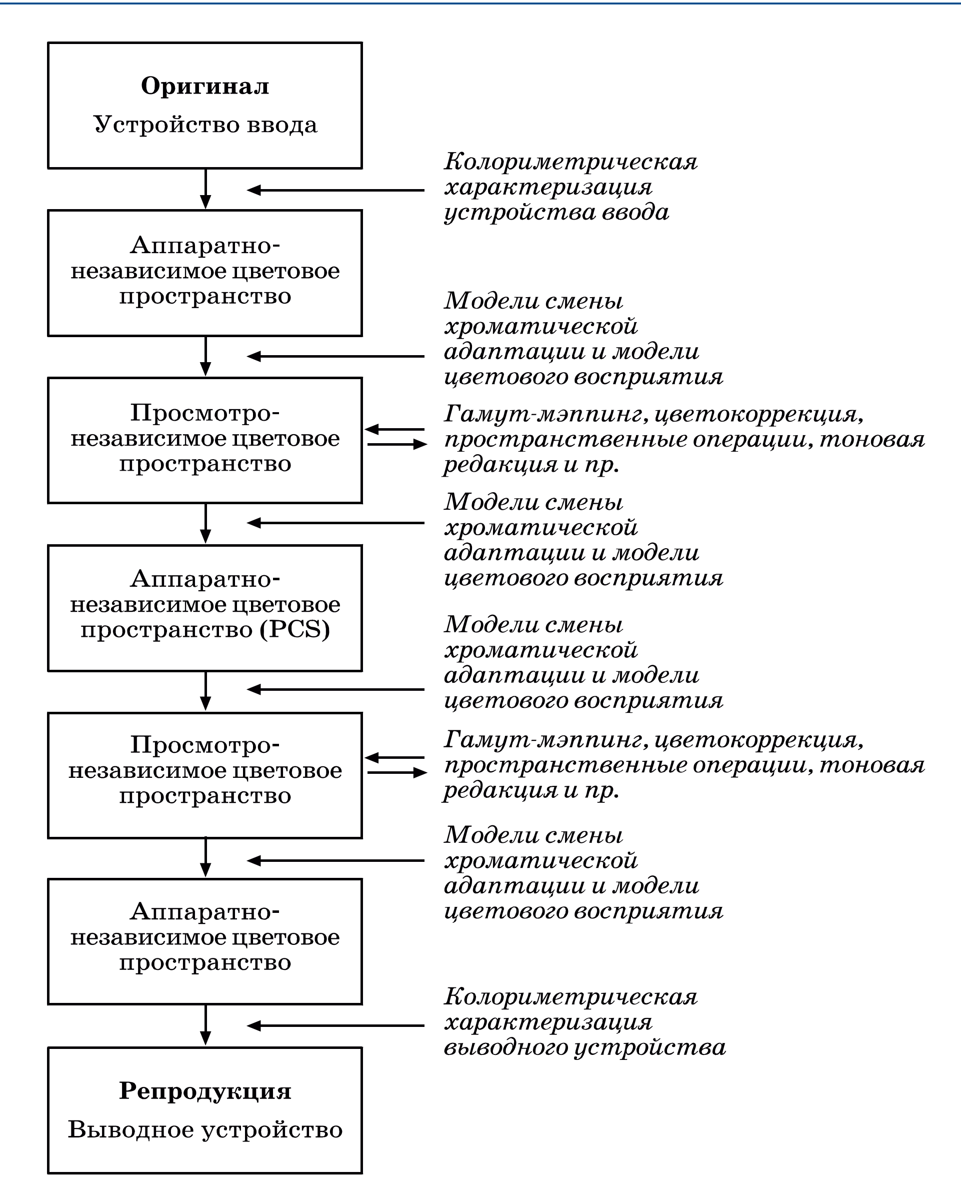


Рис. 19.4 Общая схема процесса аппаратно-независимого цветовоспроизведения, обновленная концепцией пространства связи профайлов (ICC).

ные монитора непосредственно, то есть, не задействуя при этом какие-либо промежуточные пространства и даже самое PCS.[1]

Теперь предположим, что принтер калиброван и характеризован так, что предполагаемые условия просмотра отпечатка эквивалентны просмотровым условиям PCS: в этом случае выходной профайл должен содержать информацию, необходимую для преобразования из D50-CIE-координат в аппаратные координаты принтера.

---

[1] Действительно, два профайла устройств могут быть соединены непосредственно через т.н. device-link profile (профайл жесткой связки устройств — см. спецификацию профайлов). Однако необходимо отметить, что в самоем процессе объединения неизбежно участвует PCS; при этом из результирующего профайла оно исключается за ненадобностью. — *Прим. пер.*

Интересной «особенностью» данного процесса является то, что профайл устройства необходим для преобразования аппаратных координат в PCS даже в тех ситуациях, когда в использовании модели цветового восприятия нет необходимости, к примеру: если фотокамера установлена на D65 и монитор при этом тоже калиброван на D65 по белой точке, то нет никакого смысла использовать модель цветового восприятия, поскольку придется переходить к D50 PCS, а потом назад к белой точке монитора на D65. Однако же, коль скоро профайлы связаны между собой при помощи CMS, такой маршрут не создает проблем, бо все переходы выполняются одной и той же моделью.

Отметим, что ICC работает над описанной проблемой, но в текущий момент еще нет единой рекомендации по выбору модели цветового восприятия для построения ICC-профайлов, то есть, входной профайл (для перехода к PCS) может задействовать, например, хантовскую модель, в то время как программа построения выходных профайлов (для выхода из PCS) может использовать RLAB. Поскольку разница между моделями цветового восприятия весьма существенна, обработанные изображения могут разительно отличаться друг от друга даже тогда, когда применение моделей восприятия вообще не требуется. Однако же появление моделей цветового восприятия, разработанных под эгидой CIE, может помочь исправить сложившуюся ситуацию. По последним ICC-документам хорошо видно, как именно предполагается решать данную задачу.

Концепция пространства связи профайлов полностью совместима с процессом, показанным на рис. 19.1, к которому требуется лишь одно дополнение: преобразование из просмотро-независимого цветового пространства в аппаратно-независимое цветовое пространство (CIE *XYZ* или CIELAB) проходит с учетом условий просмотра, принятых в последнем. На данном этапе репродукционного процесса происходит концептуальная передача данных от одного устройства другим устройствам.

Финальный этап: преобразование данных из аппаратно-независимого цветового пространства (с определенным набором условий просмотра) в просмотро-независимое цветовое пространство, выполняемое до внесения поправок на выходные просмотровые условия. Весь процесс иллюстрирован рис. 19.4: коль скоро концепция обработки информации осталась неизменной, то о пространстве связи профайлов мы говорим как о виртуальном устройстве визуализации. Сказанное означает также, что поточная диаграмма на рис. 19.1 по-прежнему работает, но любое устройство ввода (для выводных ситуаций) или любое устройство вывода (для ситуаций ввода) благодаря пространству связи профайлов превращается в идеологически «виртуальное устройство».

20 МОДЕЛИ ВОСПРИЯТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ КАК МОДЕЛИ БУДУЩЕГО

За шесть лет, минувших с момента первого издания нашей книги, модели цветового восприятия прошли путь бурного развития, однако общий подход к решению задач остался прежним: модели стараются оперировать изолированными цветовыми стимулами, то есть максимально обособленными от прочих визуальных факторов. Вполне вероятно, что уровень развития сегодняшних моделей цветового восприятия уже достиг того рубежа, когда дальнейший прогресс потребует появления моделей нового поколения.

Сравнительно недавно Фершильд и Джонсон (2002, 2003, 2004) предложили новый класс моделей — «*модели восприятия изображений*» (image appearance models), поднимающие модели цветового восприятия на такой уровень, на котором учитываются пространственные и временные аспекты зрения, что позволяет прогнозировать восприятие сложных стимулов, а также измерять отличия между изображениями (первый шаг в направлении метрики качества изображений).

Текущая глава дает краткий обзор общей концепции моделей восприятия изображений и представляет одну из них — модель iCAM. Предстоящий разговор в целом основан на материалах соответствующей статьи Фершильда и Джонсона (2004), и завершается он размышлениями о том, что ожидается в обозримом будущем в сферах моделирования цветового восприятия и моделирования восприятия изображений.

Для того чтобы иметь возможность регулярно знакомиться с текущим положением дел в нашей области, а также периодически обновлять библиографию по вопросам моделирования цветового восприятия и восприятия изображений, рекомендуем обращаться на сайты: www.cis.rit.edu/fairchild/CAM.html и www.cis.rit.edu/mcsl/iCAM.

20.1 ОТ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ К ВОСПРИЯТИЮ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Опыт измерения сложных стимулов помогает нам определить контексты формулировки и применения моделей восприятия изображений — моделей, включающих в себя элементы естественной эволюции цветового зрения, а также элементы моделей пространственного и временно́го восприятия зрительных сти-

мулов (рассматриваемых как единое целое, а не как отдельные области исследования).

Современные системы визуализации долгое время никак не оценивались с научных позиций, или, если и оценивались, то в контексте методов, отработанных для описания свойств самих систем, к примеру: денситометры были разработаны для измерения количества красителя (или серебра) в слоях фотоматериала или толщины красочного слоя на поверхности; в электронных системах, например телевизионных, для колориметрической оценки качества системы визуализации измеряется вольтаж сигналов и т.п. (Хант, 1995).

У визуальных измерений, выполняемых с целью оценки качества изображений, воспроизведенных той или иной системой, долгая и славная история (блестяще изложенная в работе Шэйда [1956]), однако, коль скоро сегодня системы визуализации сложны и открыты, потребность в аппаратно-независимой оценке изображений самоочевидна.

Колориметрия изображений

Электронные системы визуализации, разработанные специально для цветного телевидения — это одна из первых сфер аппаратно-независимой оценки изображений. Райт (1981) указывает на то, что цветное телевидение не могло быть изобретено без колориметрии: в основу создания и стандартизации телевизионных систем (включая новейшие цифровые) была положена классическая колориметрическая система CIE.

С появлением цифровых систем визуализации CIE-колориметрия стала применяться еще шире, в частности для создания изображений, предназначенных к тиражированию разными способами (и получения цветопроб этих изображений), а использование CIE-колориметрии в аппаратно-независимом описании изображений дает надежду на решение некоторых новейших проблем цветовоспроизведения, реализуемого открытыми цифровыми системами. Напомним, что гибкость, присущая цифровым системам, дает практическую возможность расчета колориметрических данных изображения, независимо от технологических отличий между устройствами и носителями.

Научные изыскания в сфере калибровки и характеризации цветовоспроизводящих устройств начинаются с фундаментальных цветовых измерений и заканчиваются спецификацией различных аппаратов: CRT-, LCD- и проекционных мониторов, сканеров, цифровых камер, а также различных пленочных и печатных носителей (некоторые концепции и результаты таких исследований подытожены Бернсом [1997]). Исследования такого рода — это экспериментальный базис науки о цветовом восприятии и восприятии изображений, дающий возможность глубже понять фундаментальные проблемы аппаратно-независимого цветовоспроизведения, а именно:

— общеконцептуальные проблемы, возникающие в данной сфере (Фершильд, 1994);

— проблемы разработки алгоритмов гамут-мэппинга, выполняемого с целью воспроизведения требуемых цветовых стимулов, выходящих за границы цветового охвата целевого устройства (Браун и Фершильд, 2000);

— проблемы визуализации средствами компьютерной графики высококачественных спектральных изображений (high-quality spectral images) (технология, радикально повышающая точность данных о цветовых стимулах регистрируемой сцены [Джонсон и Фершильд, 1999]).

Процесс создания и тестирования моделей цветового восприятия в контексте воспроизведения изображений разными способами целиком строится на исследованиях данного типа.

Уравнения цветовых отличий

Итогом многолетних исследований в сфере цветовых отличий стала формула CIEDE2000 (Луо и колл., 2001), в основу которой положено некое равномерное цветовое пространство. Напомним, что в 1976 г. CIE рекомендовала два сугубо временных и далеких от совершенства цветовых пространства — CIELAB и CIELUV. Позднее, признав неравномерность CIELAB, комиссия разработала усовершенствованные формулы цветовых отличий (CIE ΔE^*_{94} и CIEDE2000), которые, несомненно, лучше и вполне способны прогнозировать перцепционные отличия между простыми цветовыми патчами. Заметим при этом, что в истинно равномерном пространстве цветовые отличия могут измеряться как простое эвклидово расстояние между цветовыми координатами двух стимулов (к примеру, CIE ΔE^*_{ab}).

Отличие изображений

CIE-формулы цветовых отличий были разработаны с использованием простых цветовых стимулов в определенных условиях просмотра, однако нет никаких оснований полагать, что эти формулы способны прогнозировать цветовые отличия между пространственно-сложными стимулами.

Для оценки сложных цветовых стимулов, таких, как полутоновые образцы, была разработана модель S-CIELAB (Чанг и Ванделл, 1996), выступающая в роли некоего предобработчика данных (pre-processor), предназначенных в конечном итоге для стандартных CIE-формул. Для аппроксимации контрастно-сенситивных функций (CSF)[1] зрительной системы человека пространственная предобработка задействует т.н. разделяемые ядра свертки (separable convolution kernels).

CSF необходимы для удаления из изображения лишней информации, то есть информации, не воспринимаемой зрительной системой человека (к примеру, все мы знаем, что растровые точки при определенном расстоянии просмотра начинают сливаться в единый цветовой стимул). Попиксельное вычисление цветовых отличий между изображением непрерывного тона и автотипным (растрированным. — *Прим. пер.*) изображением будет давать очень большие расхождения, тогда как визуальные отличия могут быть очень маленькими. Пространственная предобработка «размывает» автотипное изображение, приближая его к изображению непрерывного тона.

---

[1] См. гл. 1. — *Прим. пер.*

Сравнительно недавно S-CIELAB была модифицирована и расширена: появилась возможность вычислять отличия между изображениями (Джонсон и Фершильд, 2001, 2003). Модернизация (см. раздел 20.3) коснулась уравнений CSF: к S-CIELAB были добавлены блоки пространственно-частотной адаптации, пространственной локализации, а также блоки детекции локального и общего контрастов.

Таким образом, S-CIELAB — это первый прецедент т.н. *модели отличия изображений*, основанной на CIELAB-пространстве и уравнениях цветовых отличий.

Цветовое восприятие

К сожалению, фундаментальная CIE-колориметрия не в состоянии полностью специфицировать изображения: природа последних такова, что, зарегистрированные или воспроизведенные различными цифровыми системами, они неизбежно будут рассматриваться в огромном диапазоне условий просмотра (от условий оригинальной сцены до экранного отображения в тускло освещенной комнате). Таким образом, модели цветового восприятия призваны поднять базовую CIE-колориметрию с уровня цветовых соответствий (при фиксированных условиях просмотра) на уровень прогнозирования цветового восприятия (при разных способах воспроизведения и просмотровых условиях).

Возможность применения к цифровым системам визуализации результатов исследований в области моделирования цветового восприятия весьма активно обсуждалась еще в 90-х годах прошлого века, и в 1997 г. история завершилась созданием CIECAM97s (см. гл. 15), а спустя шесть лет вышел ее модифицированный вариант — CIECAM02 (см. гл. 16). Своим развитием обе модели во многом обязаны визуальным экспериментам, выполненным в целях проверки работы публикуемых моделей в контексте репродуцирования изображений (Браун и Фершильд, 1997).

Таким образом, исследования в области цветовосприятия, будучи основанными на работе с изображениями, выдвинули на передний план вопросы восприятия пространственно-сложных стимулов (изображений) и проблемы оценки их качества.

Восприятие изображений и их качество

Модели цветового восприятия учитывают изменения в условиях просмотра, но при этом ориентированы в основном на изменения в цвете осветителя (белая точка), уровне освещенности (фотометрическая яркость) и относительной яркости окружения. Модели восприятия не имеют непосредственного отношения к различным пространственным или временны́м свойствам человеческого зрения, в частности пространственным и временны́м свойствам восприятия изображений: по сути, эти модели рассматривают каждый пиксел изображения (и каждый кадр в видео) как полностью независимые стимулы.

Зрительная адаптация к сцене или изображению — это физиологическая реакция, зависящая не только от пространственно-локализованных низкочас-

тотных (low-pass) атрибутов сложных цветовых стимулов, но еще и от их временны́х параметров.

Для прогнозирования восприятия цифровых видеокадров (в частности, с большим динамическим диапазоном), должны учитываться временны́е свойства световой и хроматической адаптаций. Для прогнозирования качества (или отличия) изображений видеоряда к пространственным фильтрам, удаляющим незамечаемые пространственные артефакты (к примеру, шум или JPEG-компрессию), должны быть добавлены временны́е фильтры, то есть фильтры, удаляющие невоспринимаемые высокочастотные темпоральные модуляции (т.е. незамечаемое «мерцание»).

Не составит труда показать то, что адаптация имеет важную низкочастотную временну́ю характеристику, к примеру: если неожиданно включить свет в темной комнате (скажем, рано утром после сна), то повышенный уровень освещения в первый момент ослепляет зрительную систему, то есть, по сути, «переэкспонирует» ее. Однако спустя короткий период времени зрение адаптируется к высокому уровню освещения, и к наблюдателю возвращается нормальное зрительное восприятие. Сказанное справедливо и для обратных ситуаций, например, когда из обстановки с высоким уровнем освещения переходят в обстановку с низким уровнем (представьте себе, что солнечным днем вы въезжаете в темный тоннель).

Фершильд и Ренифф (1995), а также Риннер и Гегенфуртнер (2000) дают детальное описание временно́го компонента хроматической адаптации. Результатом исследования явились т.н. темпорально-интегративные функции, которые можно использовать при моделировании восприятия движущихся изображений, а также проиллюстрировать ими один из механизмов адаптации к стимулам низкой пространственной частоты (последнее связано с непрерывным движением глазных яблок).

В свое время было выполнено серьезное исследование качества видеоизображений (и метрики этого качества), нацеленное на создание и оптимизацию алгоритмов кодирования/компрессии/декодирования, в частности MPEG2 и MPEG4. Аналогично модель Дэли (Дэли, 1993), прогнозирующая степень видимых отличий в статичных изображениях (still-image visible differences predictor), вполне пригодна для прогнозирования видимости артефактов, появляющихся в статичном изображении после его JPEG-компрессии, то есть — модель Дэли была создана для прогнозирования вероятности визуального обнаружения артефактов.

При разработке iCAM пошли дальше, и, вместо того чтобы ориентироваться на пороговые отличия в качестве, внимание было сосредоточено на шкалировании качества изображений по их отличиям от оригинала, лежащим выше порога различимости (к примеру, создание шкал резкости, контраста, зернистости).

Отметим, что надпороговые отличия между изображениями — это область исследования, касающаяся именно восприятия изображений и непосредственно относящаяся к вопросу их качества.

Аналогичная ситуация имеет место в метрике качества видеоизображений, которая была разработана для выявления вероятности обнаружения артефак-

тов в видеоизображениях. Отметим, однако, что как таковых моделей восприятия видеоизображений, способных прогнозировать величины воспринимаемых отличий в видеоряде, не существует.

Дабы подчеркнуть отличие целей и задач iCAM от целей и задач ранее опубликованных моделей, мы коротко опишем две широко известных модели качества видеоизображений (модель Sarnoff JND и модель NASA DVQ).

Модель Sarnoff JND — это основа программного пакета «JNDmetrix» (www.jndmetrix.com), предназначенного для некоего специального оборудования, контролирующего качество видеоизображений. Модель кратко описана в техническом отчете Sarnoff (2001), а более полный материал можно найти в публикации ATIS (2001).

Модель Sarnoff JND основана на т.н. мультимасштабной модели пространственного зрения (Lubin, 1993, 1995), расширенной в направлении цветовой обработки и временны́х вариаций стимулов. Модель Lubin сходна с моделью Дэли в том, что тоже создана для прогнозирования вероятности распознавания артефактов в изображениях, то есть для выявления пороговых изменений (часто называемых «едва заметными отличиями», или «JNDs»).

В отличие от iCAM модель Sarnoff JND не имеет механизма учета хроматической и яркостной адаптаций: на входе Sarnoff выполняется заурядная нормировка данных (что можно рассматривать лишь как зачаточную форму модели адаптации). Отметим, что временны́е аспекты Sarnoff-модели нацелены не на прогнозирование восприятия видеоряда, а на прогнозирование обнаружения временны́х артефактов.

Во временно́й обработке стимулов модель задействует только два рабочих окна (четыре поля), и, таким образом, несмотря на то, что она способна прогнозировать воспринимаемость относительно высокочастотных вариаций стимулов в видео (мерцание), она не может предсказать различимость низкочастотных вариаций (последнее требует использования модели, ориентированной на восприятие, а не на JND). Модель Sarnoff также не предназначена для видеовизуализации.

Сказанное выше не является критикой Sarnoff-модели, но иллюстрацией того, насколько сильно ее цели отличны от целей и задач iCAM.

Заметим, что наука о зрении утверждает, что JND-прогнозы нелинейно соотносятся с восприятием надпороговых отличий, — это значит, что использование JND-модели в целях прогнозирования надпороговых отличий в изображениях вполне возможно, и, таким образом, Sarnoff JND-модель может с определенным успехом применяться к надпороговым данным.

Подобной Sarnoff JND является *DVQ*-модель (Digital Video Quality), разработанная NASA и опубликованная в свое время Ватсоном (1998, 2001). *DVQ*-метрика аналогична концепции Sarnoff JND, но существенно отличается от нее по исполнению: ее пространственное деление основано на т.н. коэффициентах дискретного косинус-преобразования (discrete cosine transformation — *DCT*), контролирующего работу аппаратов и, в частности, пригодного для распознавания артефактов в *DCT*-алгоритмах видеосжатия. Модель также имеет

развитый временной фильтр, способный прогнозировать различные темпоральные артефакты.

Подобно Sarnoff JND, модель *DVQ* нацелена на прогнозирование вероятности визуального обнаружения пороговых отличий между изображениями, а не на прогноз восприятия через пространственную или временну́ю адаптации (или атрибуты восприятия), и, следовательно, не может применяться для видеовизуализации. И вновь мы скажем, что это не недостаток, а скорее целевая особенность модели *DVQ*.

Несмотря на то, что модели цветового восприятия, будучи внедренными в современные CMS, весьма успешно управляют процессом аппаратно-независимого цветовоспроизведения, еще многое предстоит сделать в плане их усовершенствования и расширения возможностей.

Для решения проблем описания и учета пространственных свойств зрения, а также для описания результатов восприятия изображений и оценки их качества была выдвинута концепция *моделей восприятия изображений* (Фершильд и Джонсон, 2002; Фершильд, 2002): модели восприятия изображений сочетают в себе элементы моделей цветового восприятия с элементами моделей пространственного зрения (последние и ранее использовались в метрике качества изображений с целью модернизации моделей восприятия).

До сего времени модели цветового восприятия, такие, как CIECAM97s и CIECAM02, игнорировали пространственные аспекты зрения, в то время как собственно модели пространственного зрения, предназначенные для оценки качества изображений, игнорировали цвет (Дэли, 1993; Lubin, 1993). Определенное исключение представляют собой ранее упоминавшиеся ретинексные модели (Лэнд, 1964, 1986; Лэнд и Мак-Канн, 1971; Мак-Канн и колл., 1976) и их всевозможные производные (Фант и колл., 2000; Барнард и Фант, 1997; Брайнард и Ванделл, 1986). Несмотря на то, что ретинексная модель никогда не была ни полной моделью восприятия изображений, ни моделью оценки их качества, ее гибкие пространственные механизмы хроматической адаптации и цветовой константности в конечном счете служат целям визуализации изображений и готовят почву для создания моделей их восприятия. Пространственные ATD-модель (Грэнджер, 1993) и S-CIELAB-модель (Чанг и Ванделл, 1996) также в какой-то степени касаются обсуждаемых проблем.

Целью создания моделей восприятия изображений является объединение двух описанных выше областей исследования, результатом чего должна стать единая модель, способная к прогнозированию зрительного восприятия сложных стимулов, их специфицированию, воспроизведению и оценке качества воспроизведения. Один из фактических прецедентов — модель iCAM, предназначенная для работы со статичными изображениями, детально описана в текущей главе.

Модель iCAM была создана на основе результатов исследований, проведенных по следующим направлениям:

— равномерные цветовые пространства (Эбнер и Фершильд, 1998);

— значимость учета окружения (Фершильд, 1995);

— алгоритмы расчета отличий между изображениями и оценка их качества (Джонсон и Фершильд, 2003; Фершильд, 2002);

— изучение глазных движений наблюдателя при решении им различных зрительных задач и в условиях адаптации к естественным сценам (Бабкок и колл., 2003; Вебстер и Моллон, 1997);

— анализ прежних моделей пространственного и цветового зрения в приложении к проблемам цветового восприятия и воспроизведения изображений с большим динамическим диапазоном (high-dinamic-range imaging) (Паттанайк и колл., 1998).

Модели цветового восприятия и модели восприятия изображений

Модель цветового восприятия, способная прогнозировать цветовые отличия между сложными стимулами (изображениями) — это хороший инструмент, однако его возможности весьма ограничены. Если такая модель необходима для полного описания результатов зрительного восприятия простых цветовых стимулов, то модель восприятия изображений необходима для описания результатов восприятия стимулов со сложной пространственной структурой. Если модели цветового восприятия позволяют дать четкое описание перцепционных атрибутов (светлоты, субъективной яркости, полноты цвета, насыщенности и цветового тона), то модели восприятия изображений (наряду с возможностями моделей цветового восприятия) позволяют прогнозировать и такие атрибуты сложных стимулов, как резкость (sharpness), зернистость (graininess), контраст и разрешение (resolution).

Как и в моделях цветового восприятия, в основе моделей восприятия изображений лежит равномерное цветовое пространство, а заложенный в них блочный принцип обеспечивает особую гибкость в выборе цветовых пространств, к примеру, может быть выбрано CIELAB-пространство, сходное с ним S-CIELAB-пространство, CIECAM02 или *IPT*-цветовое пространство (Эбнер и Фершильд, 1998). То есть, блочный принцип вполне может быть реализован и в iCAM (для превращения ее в полную модель восприятия изображений и/или в модель их отличия).

Модели восприятия изображений можно использовать для создания многомерных моделей качества изображений, к примеру: можно взять взвешенные суммы различных атрибутов восприятия для получения метрики общего качества изображений (Киелан, 2002; Энгельдрум, 2002). Такие модели могут усилить или даже заменить собой человеческие наблюдения за весовыми параметрами изображений, например, модель качества изображений может оперировать взвешенными суммами тонального баланса, контраста и резкости. Шаги, которые уже сделаны в этом направлении, будут описаны ниже.

20.2 СТРУКТУРА ICAM-МОДЕЛИ

На рис. 20.1 дана поточная диаграмма общей структуры iCAM-модели в применении к статичным изображениям.

На входе модель требует колориметрически характеризованных данных изображения (или сцены), а также данных об окружении (в абсолютных единицах фотометрической яркости). Самое изображение описывается относительными CIE *XYZ*-трехстимульными значениями, тогда как в качестве адаптирующего стимула берется CIE *XYZ*-изображение, фильтрованное по низкой пространственной частоте, и к которому добавлена информация о его абсолютной фотометрической яркости (необходима для прогнозирования степени хроматической адаптации).

Для контроля различных яркостно-зависимых функций модели, отвечающих за прогнозирование эффектов Ханта (рост полноты цвета стимулов по мере роста их фотометрической яркости) и Стивенса (рост визуального контраста изображения по мере роста яркости его элементов), используются пространственно-низкочастотные абсолютные яркости (Y) элементов изображения.

Наконец, для прогнозирования контраста изображения учитывается та же пространственно-низкочастотная яркость изображения (Y), но с существенно меньшей частотой (четко установлено, что контраст изображения — это в том числе функция от относительной яркости окружения [формулы Бартлесона и Бренемана]).

Адаптирующие изображения обрабатываются некими специфическими низкочастотными фильтрами (F_L), работа которых зависит как от дистанции просмотра, так и от целевого назначения исследуемых изображений.

Отметим также, что во избежание падения общей насыщенности репродукции (возникающего порой за счет локальной хроматической адаптации) желательными могут оказаться иные яркостные и хроматические характеристики пространственно-низкочастотных адаптирующих стимулов.

Сказанное — один из примеров учета разного рода зависимостей в моделировании восприятия изображений: локальная хроматическая адаптация может соответствовать измерениям величины отличия (image-difference) или уровня качества изображений (image-quality) , но не соответствовать ситуациям визуализации изображений (image-rendering).

Первая стадия обработки изображений по iCAM — это учет смены хроматической адаптации: iCAM задействует расчет, взятый из CIECAM02, поскольку последний хорошо изучен и блестяще зарекомендовал себя в работе со всеми доступными визуальными данными. К тому же он является сравнительно простой математической операцией, вполне подходящей для обработки изображений.

Модель хроматической адаптации, заложенная в iCAM (уравнения 20.1–20.6) — это линейная фонкризовская нормировка *RGB*-сигналов изображения до *RGB*-адаптированных сигналов по каждому пикселу пространственно-низкочастотного адаптирующего изображения ($R_W G_W B_W$).

RGB-сигналы вычисляются с использованием линейного преобразования *XYZ*-значений, взятого из CIECAM02 (TC8-01), а полученный результат моду-

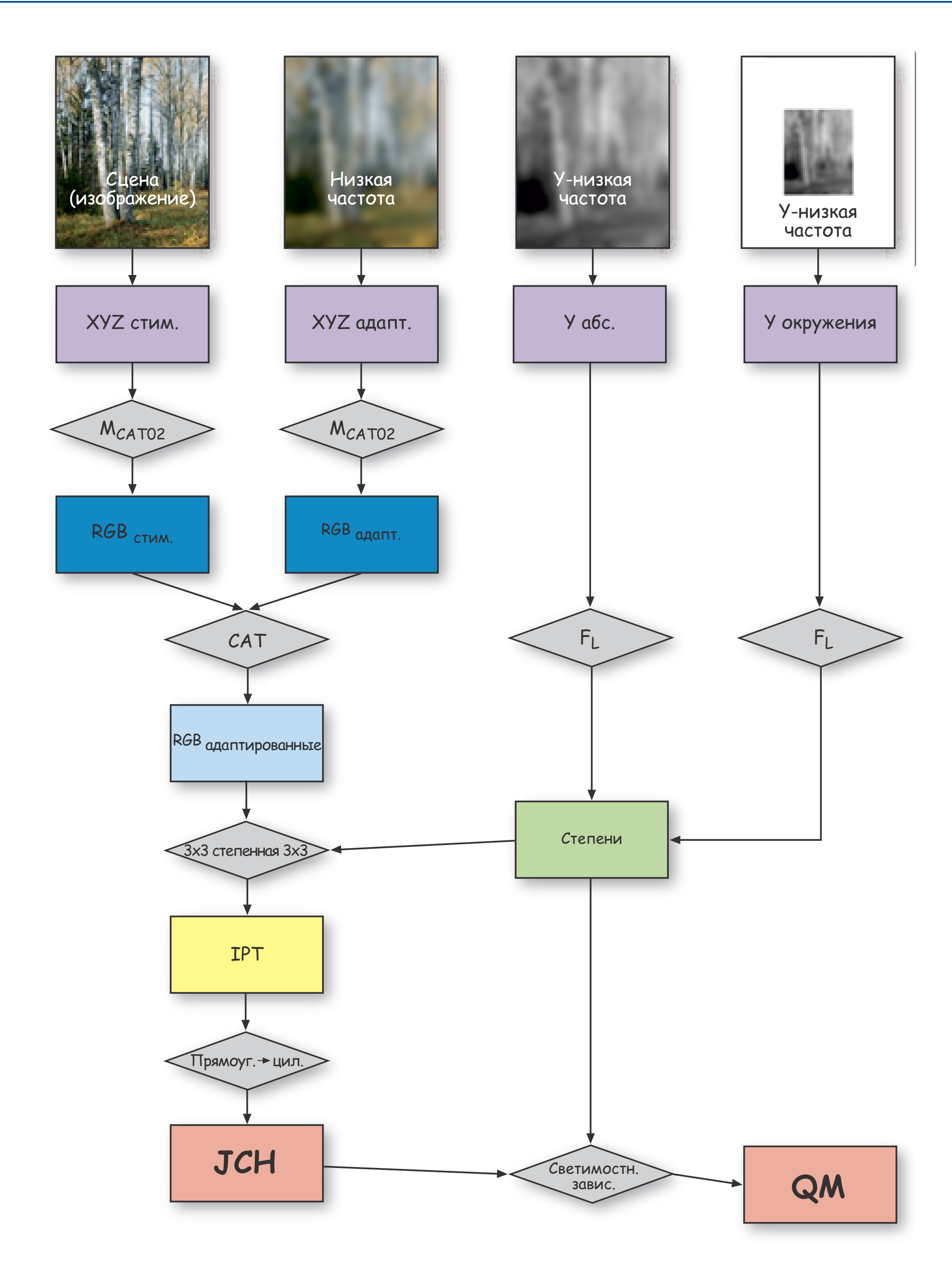


Рис. 20.1 Поточная диаграмма работы модели восприятия изображений iCAM. На вход подаются: CIE-трехстимульные значения (*XYZ*) изображения (или сцены); адаптирующий стимул, представляющий собой то же самое изображение (сцену), но отфильтрованное по низкой пространственной частоте; информация об абсолютной фотометрической яркости адаптирующего стимула. Адаптированные сигналы вычислены с использованием линейного преобразования хроматической адаптации (взятого из CIECAM02) с последующей конверсией их в оппонентное *IPT*-пространство (использует информацию о яркости для модуляции нелинейной компрессии). Прямоугольные *IPT*-координаты конвертируются в цилиндрические корреляты светлоты (*J*), насыщенности (*C*) и цветового тона (*h*). Для получения коррелятов субъективной яркости (Q) и полноты цвета (M) светлота и насыщенность шкалируются на функцию абсолютной яркости. При необходимости может быть вычислен коррелят чистоты цвета (отношение насыщенности к светлоте или полноты цвета к субъективной яркости).

лируется коэффициентом степени адаптации (D), лежащим в диапазоне от 0.0 (отсутствие адаптации) до 1.0 (полная адаптация).

Для вычисления D-коэффициента (как функции от адаптирующей яркости (L_A) при разных условиях просмотра) iCAM использует уравнение 20.3, взятое из CIECAM02. Вместе с тем, D-коэффициент может быть выставлен и вручную.

$$\begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix} = \mathbf{M}_{\mathrm{CAT02}} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \quad (20.1)$$

$$\mathbf{M}_{\mathrm{CAT02}} = \begin{vmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{vmatrix} \quad (20.2)$$

$$D = F\left[1 - \left(\frac{1}{3.6}\right) e^{\left(\frac{-(L_A+42)}{92}\right)}\right] \quad (20.3)$$

$$R_C = \left[\left(100\frac{D}{R_W}\right) + (1-D)\right]R \quad (20.4)$$

$$G_C = \left[\left(100\frac{D}{G_W}\right) + (1-D)\right]G \quad (20.5)$$

$$B_C = \left[\left(100\frac{D}{B_W}\right) + (1-D)\right]B \quad (20.6)$$

Для дальнейшей работы iCAM модель смены хроматической адаптации рассчитывает согласованные стимулы по D65-осветителю: адаптированные сигналы по данным условиям просмотра ($R_C G_C B_C$) с помощью уравнений 20.1–20.6 инвертируются по белой точке на D65 (и при $D = 1.0$). Однако, несмотря на то, что данный расчет идентичен CIECAM02, модель iCAM всерьез отличается от нее, поскольку на входе задействует пространственно-модулированные данные изображения, а не единичные цветовые стимулы и адаптирующие точки. К примеру, вот как выглядит модуляция изображения по абсолютной яркости и по яркости окружения с использованием F_L-функции, взятой из CIECAM02 (уравнение 20.7):

$$F_L = 0.2\left(\frac{1}{(5L_A+1)}\right)^4 (5L_A) + 0.1\left(1 - \left(\frac{1}{(5L_A+1)}\right)^4\right)^2 \sqrt[3]{(5L_A)} \quad (20.7)$$

Данная функция, при деликатном манипулировании значением адаптирующей яркости, позволяет прогнозировать различные яркостно-зависимые эффекты восприятия (что реализовано в CIECAM02 и в более поздних моделях). Функция успешно задействуется на первых стадиях работы iCAM, однако методики использования коэффициента F_L, как уже было отмечено, в CIECAM02 и в iCAM сильно рознятся.

Следующий этап в работе iCAM — конверсия *RGB*-сигналов (грубая аналогия колбочковым сигналам в зрительной системе человека) в оппонентные цветовые сигналы: светлый-темный, красный-зеленый и желтый-синий (аналогия высокоуровневого кодирования в зрительной системе), которые необходимы для создания перцепционно-равномерного цветового пространства и получения коррелятов различных атрибутов восприятия. Критериями выбора именно такого преобразования в свое время явились его применимость к обработке изображений и точность расчетов.

В качестве цветового пространства было выбрано некое *IPT*-пространство (Эбнер и Фершильд,1998), которое создавалось специально для работы с изображениями и к которому предъявлялось два требования:

— относительно простая структура;

— точность в прогнозах контуров постоянного цветового тона (критично для приложений гамут-мэппинга).

Отметим, что более поздние исследования еще раз подтвердили соответствие *IPT*-пространства упомянутым требованиям.

Преобразование из *RGB* в *IPT*-оппонентное пространство (которое много проще, чем преобразования, «зашитые» в CIECAM02) выражается уравнениями 20.8–20.12 и имеет следующую структуру:

— линейное преобразование в самостоятельное пространство колбочковых ответов;

— применение степенной функции;

— заключительное линейное преобразование в *IPT*-оппонентное пространство (*I* — светлый-темный; *P* — красный зеленый; *T* — желтый-синий).

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4002 & 0.7075 & -0.0807 \\ -0.2280 & 1.1500 & 0.0612 \\ 0.0 & 0.0 & 0.9184 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{D65} \\ Y_{D65} \\ Z_{D65} \end{bmatrix} \quad (20.8)$$

$$L' = L^{0.43}; L \geq 0 \quad (20.9)$$
$$L' = -|L|^{0.43}; L \leq 0$$

$$M' = M^{0.43}; M \geq 0 \quad (20.10)$$
$$M' = -|M|^{0.43}; M \leq 0$$

$$S' = S^{0.43}; S \geq 0 \quad (20.11)$$
$$S' = -|S|^{0.43}; S \leq 0$$

$$\begin{bmatrix} I \\ P \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4000 & 0.4000 & 0.2000 \\ 4.4550 & -4.8510 & 0.3960 \\ 0.8056 & 0.3572 & -1.1628 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L' \\ M' \\ S' \end{bmatrix} \qquad (20.12)$$

Ключевой узел iCAM — нелинейная функция в IPT-преобразовании:

— во-первых, она необходима для прогнозирования нелинейной компрессии ответа, превалирующей в большинстве сенсорных систем человека. Такая компрессия помогает конвертировать физически-линейные сигналы (к примеру, яркость) в перцепционно-линейные размерности (к примеру, светлоту). Коль скоро CIECAM02 использует гиперболически нелинейную функцию, то охватывается практически весь диапазон возможных яркостей;

— во-вторых, степени этой функции модулируются яркостями низкочастотно-фильтрованного изображения и его окружения, что достигается путем умножения базовой степени IPT-системы на определенным образом нормированные F_L-коэффициенты (вычисляются по контексту изображения [image-wise computed]). Такое управление IPT-степенями позволяет iCAM-модели прогнозировать эффекты Ханта, Стивенса и Бартлесона — Бренемана.

Отметим также то, что модель может выполнять визуально-приемлемый тоновый мэппинг HDR-изображений[1] в низкий динамический диапазон воспроизводящей системы (см. пример на рис. 20.7).

Для прогноза отличия изображений (а также их качества) к последним необходимо применить пространственный фильтр, дабы исключить возможные вариации по пространственным частотам, лежащим ниже порога восприятия (так, например, если расстояние просмотра достаточно велико, растровые точки могут быть незаметны). Обработка зависит от дистанции просмотра и основывается на фильтрах, полученных из контрастно-сенситивных функций человека (CSF). Поскольку CSF яркостной (высокочастотной) и хроматической (низкочастотной) чувствительностей изменчивы, то понятно, что применять эти фильтры следует на оппонентной стадии восприятия, то есть — на стадии IPT.

Так как пространственная фильтрация, прогнозирующая результат восприятия, уместна только в системе линейных сигналов, она задействуется на линейной стадии IPT, то есть *до* конверсии в нелинейную версию этого пространства. Джонсон и Фершильд (2001, 2003) указывают на важность такого типа фильтрации при оценке различий в изображениях и дают спецификацию необходимых фильтров, основанную на визуальных данных. Вместе с тем, как уже было сказано ранее, пространственная фильтрация сильно «размывает» элементы изображения, что нежелательно в тех случаях, когда наблюдатели рассматривают его ближе, чем предписанная дистанция просмотра.

Примером контрастно-сенситивных функций, используемых для создания пространственных фильтров iCAM, являются уравнения 20.13 и 20.14 (получены аппроксимацией экспериментальных данных): формула 20.13 представля-

---

[1] High-Dynamic-Range images — HDR. Изображения с высоким динамическим диапазоном (энергетическим контрастом). — *Прим. пер.*

ет CSF, отвечающую за яркостный канал (I-канал), а уравнение 20.14 — за каналы хроматические (P- и T-каналы):

$$\mathrm{CSF}_{\mathrm{lum}}(f) = a \cdot f^{c} \cdot e^{-b \cdot f} \tag{20.13}$$

$$\mathrm{CSF}_{\mathrm{chrom}}(f) = a_1 \cdot e^{-b_1 \cdot f^{c_1}} + a_2 \cdot e^{-b_2 \cdot f^{c_2}} \tag{20.14}$$

где a, b и c устанавливаются на 75, 0.2 и 0.8 соответственно по яркостной CSF, примененной к I-каналу. Пространственная частота f определена в циклах на градус визуального угла (cpd — cycles per degree). По красно-зеленой хроматической CSF, примененной к P-размерности, параметры a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2 устанавливаются соответственно на 109.14, 0.00038, 3.424, 93.60, 0.00367, 2.168. По сине-желтой хроматической CSF, примененной к T-размерности, — соответственно на 7.033, 0.000004, 4.258, 40.69, 0.10391, 1.6487.

Применение пространственных фильтров оправдано только тогда, когда целью является вычисление перцепционных отличий в изображениях (то есть в конечном счете оценка их качества). В этом состоит принципиальная разница между пространственно-локализованной адаптацией (пригодной и для метрики визуализации, и для метрики качества) и пространственной фильтрацией (пригодной для метрики качества, но не пригодной для метрики визуализации).

При оценке качества изображений пространственная фильтрация обычно разбивается на отдельные частотные и ориентационные каналы (Дэли, 1993; Lubin, 1993 и Паттанайк, 1998), при этом отметим, что в мультишкальных и мультиориентационных фильтрациях чаще всего нет необходимости, о чем свидетельствуют результаты сравнительно недавних экспериментов (Джонсон и Фершильд, 2001, 2003; Ватсон и Рамирес, 2000). Таким образом, для сохранения простоты и легкости использования iCAM-модели чаще всего применяется т.н. изотропная моношкальная пространственная фильтрация.

Когда по данным изображения вычислены IPT-координаты, то для получения предикторов светлоты (J), насыщенности (C) и угла цветового тона (h) выполняется простое преобразование прямоугольных координат в координаты цилиндрические (уравнения 20.15–20.17). Отличия в данных размерностях могут быть использованы для набора статистики отличия изображений, а статистические данные, в свою очередь, — для получения метрики их качества.

В целом по изображению общее эвклидово отличие описывается величиной ΔIm в IPT-пространстве (уравнение 20.20), что отличает ее от традиционной ΔE (CIELAB), включенной в пространственную фильтрацию. Отметим также, что в ряде случаев могут понадобиться корреляты абсолютных атрибутов восприятия — субъективной яркости (Q) и полноты цвета (M), которые получают путем шкалирования относительных атрибутов (светлоты и насыщенности) на соответствующую F_L-функцию, получаемую из контекстной карты яркостей изображения (уравнения 20.18 и 20.19).

$$J = I \tag{20.15}$$

$$C = \sqrt{P^2 + T^2} \tag{20.16}$$

$$h = \tan^{-1}\left(\frac{P}{T}\right) \tag{20.17}$$

$$Q = \sqrt[4]{F_L} J \tag{20.18}$$

$$M = \sqrt[4]{F_L} C \tag{20.19}$$

$$\Delta Im = \sqrt{\Delta I^2 + \Delta P^2 + \Delta T^2} \tag{20.20}$$

Финальный этап: визуализация изображений, для выполнения которой необходимо обработать величины JCh по тем или иным условиям просмотра (именно условия просмотра определяют параметры инверсии IPT-модели и параметры расчета смены хроматической адаптации, конечно при условии пространственной однородности отображения на типичных носителях с низким динамическим диапазоном). Инверсия, выполняемая таким способом, позволяет воспроизводить изображения, сохраняя их восприятие даже в тех условиях просмотра, что принципиально отличны от условий оригинальной сцены или изображения. Одной из наиболее важных областей применения такого способа является воспроизведение HDR-изображений на типичных носителях.

20.3 МОДЕЛЬ ОТЛИЧИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Общая структура метрики цветового отличия изображений описана Джонсоном и Фершильдом (2001), а в блочном виде метрика интегрирована в iCAM-модель и адресована как собственно восприятию изображений, так и отличию между ними. Для того чтобы метрика отличия изображений была гибкой и адаптивной, она изначально разрабатывалась как блочная, а ее структура основывалась на системе S-CIELAB (последняя, как уже было сказано, является пространственным расширением CIELAB).

S-CIELAB сочетает в себе традиционную метрику цветовых отличий с пространственными свойствами зрительной системы человека, что достигается за счет пространственной фильтрации стимулов изображения, выполняемой *до* попиксельного вычисления цветовых отличий. Блочная структура расширяет метрику отличий путем добавления к пространственной фильтрации ряда процедурных шагов, за выполнение каждого из которых отвечает свой независимый блок (каждый блок может быть отдельно протестирован и усовершенствован).

Сегодня действуют блок пространственной фильтрации, блок адаптации и блок локализации, а также блоки детекции локального и общего контрастов (Джонсон и Фершильд, 2003).

Рис. 20.2 демонстрирует блочную структуру модели отличия изображений, а происхождение и структура каждого блока кратко описаны ниже.

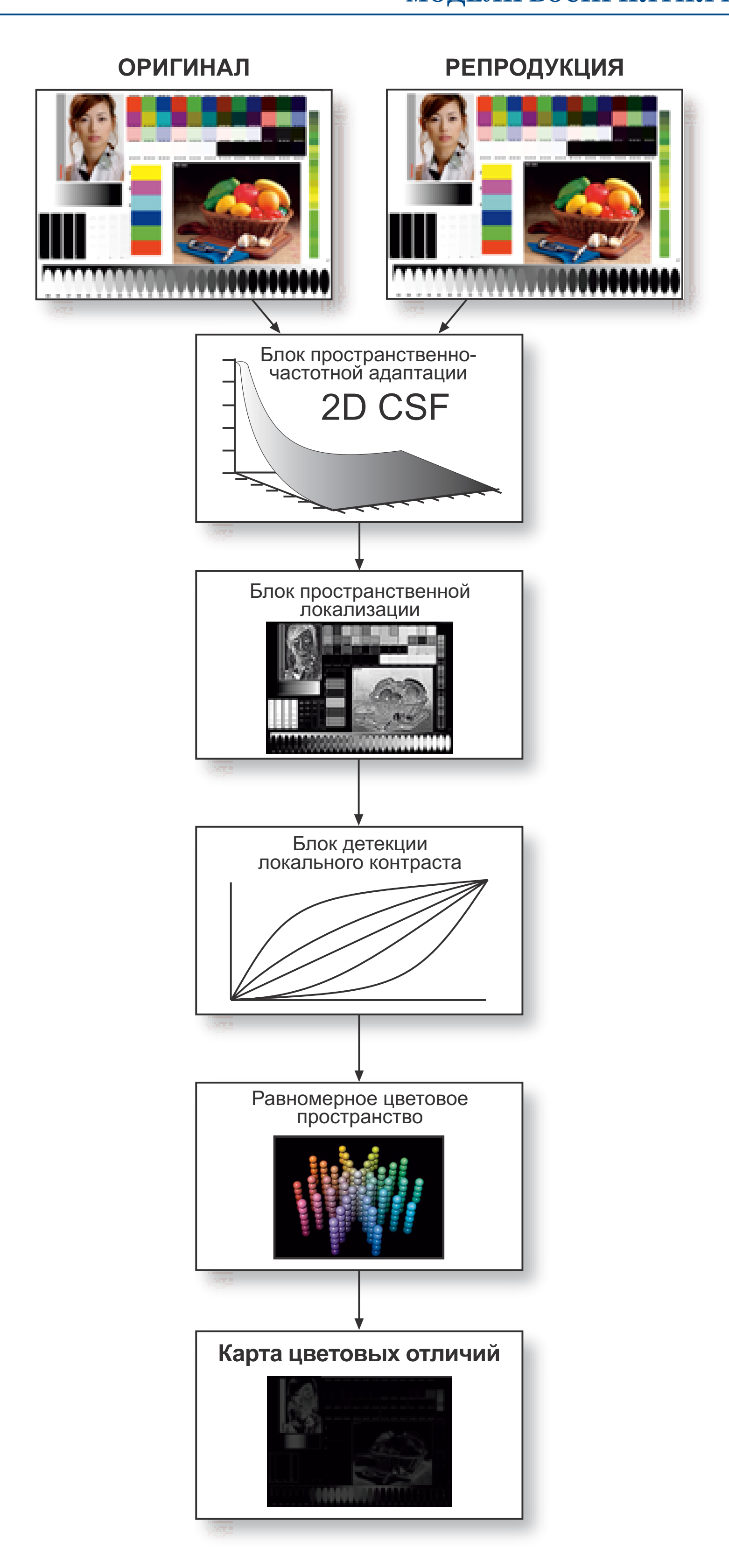


Рис. 20.2 Блочная структура метрики отличия изображений.

Блок пространственной фильтрации

В контексте пространственной частоты работу зрительной системы описывают контрастно-сенситивные функции, которые, фактически, заключены в постретинальном оппонентном цветовом пространстве (где по яркостному каналу они имеют высокочастотный характер, а по хроматическим каналам — низкочастотный). S-CIELAB для аппроксимации CSF и модуляции невоспринимаемых деталей изображения задействует т.н. разделяемые ядра свертки (separable convolution kernels); более сложные CSF, включающие в себя как модуляцию, так и принудительное повышение пространственной частоты стимулов, детально рассматриваются в работе Джонсона и Фершильда (2001). Прочие модели, обладающие сходными особенностями, — это уже упомянутые модели Lubin (1993), Дэли (1993), MOM (Паттанайк и колл., 1998), S-CIELAB (Чанг и Ванделл, 1996), а также пространственная ATD-модель (Грэнджер, 1993). Дополнительно см. у Ли и колл. (1998), Тэлора и колл. (1997, 1998), а также Брилля (1997).

Реакция зрительной системы человека на пространственно-сложные стимулы хорошо изучена Кэмпбеллом и Робсоном (1968), а также Малленом (1985), обобщение текущего знания и методов числового описания работы пространственного зрения можно найти в монографиях Де-Валойса и Де-Валойса (1998), Келли (1994), Ванделла (1995).

Блок пространственно-частотной адаптации

Рабочей основой блока пространственно-частотной адаптации является контрастно-сенситивная функция, обеспечивающая модуляцию невоспринимаемых пространственных частот и повышающая воспринимаемые пространственные частоты стимулов. В свое время CSF были измерены при помощи специальной решетки из простых стимулов, по методике, позволяющей избежать пространственно-частотной адаптации (суть которой в том, что она уменьшает чувствительность зрения к стимулам определенных пространственных частот). Следует отметить, что для прогнозирования пространственно-частотной адаптации не требуются мультишкальные и мультиканальные модели пространственного зрения: необходимо лишь, чтобы CSF были бы функциями от адаптации (прямое указание на факт существования мультишкальных механизмов).

Поскольку в реальных просмотровых условиях пространственно-частотной адаптации избежать нельзя, был создан ряд прикладных моделей (Джонсон и Фершильд, 2001), меняющих содержимое CSF на основе данных о предполагаемых условиях просмотра и/или информации о самом изображении.

Классическое и подробное описание пространственно-частотной адаптации дают Блэйкмо и Кэмпбелл (1989).

Блок пространственной локализации

Чувствительность зрительной системы к стимулам низкой и высокой пространственных частот обеспечивает модуляцию информации о высокочастот-

ных краях: общепризнано то, что зрительная система человека очень чувствительна в плане краевой детекции. Для учета данной особенности зрения был разработан блок пространственной локализации, который так же прост, как обработка изображения по т.н. ядру расширения контуров (edge-enhancing kernel). Последнее, кстати говоря, должно меняться в зависимости от расстояния просмотра. Альтернативно: CSF могут быть изменены для усиления некоторой высокочастотной информации.

Структура и прикладная ценность алгоритмов краевой детекции хорошо описана Марром (1982).

Блок детекции локального контраста

Блок детекции локального контраста отвечает за выявление отличий в локальном и общем контрастах сравниваемых изображений. Прикладная ценность такой обработки в реальных системах визуализации описана Толхарстом и Хигером (1997).

Текущее исполнение блока детекции локального контраста основано на нелинейном маскировании, работающем по принципу усиления локального контраста (Морони [2000]), то есть: низкочастотное маскирование изображения используется для генерации серии тон-репродукционных кривых, основанных как на общем контрасте изображения, так и на взаимоотношениях между единичным пикселом и ближайшими к нему соседними пикселами.

Карта цветовых отличий

На выходе модели отличия изображений находится т.н. карта цветовых отличий (ΔIm), отражающая воспринимаемую величину ошибки по каждой паре пикселов данного пространственного положения в оригинале и в репродукции. Отметим, что карта весьма полезна для выявления специфических или систематических ошибок в цветовоспроизводящей системе.

Карту цветовых отличий позволительно (и даже нужно) упрощать: путем аккуратных манипуляций со статистической информацией ее данные можно представлять в виде диаграммы минимальных (или максимальных) отличий или диаграммы стандартной девиации. Выбор категории статистических данных определяется прикладной задачей, например: диаграмма минимальных ошибок больше подойдет для описания общего отличия между оригиналом и репродукцией, тогда как диаграмма максимальных лучше опишет пороговые отличия.

20.4 ВОСПРИЯТИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ИХ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Рис. 20.3 демонстрирует рабочую структуру iCAM в контексте тонового мэппинга HDR-изображений.

Ядром процесса является инверсия IPT-модели в набор неких пространственно-константных параметров условий просмотра и установка пространственных фильтров на адаптирующие стимулы. Несмотря на то, что оптимальные параметры для визуализации HDR-изображений пока еще окончательно

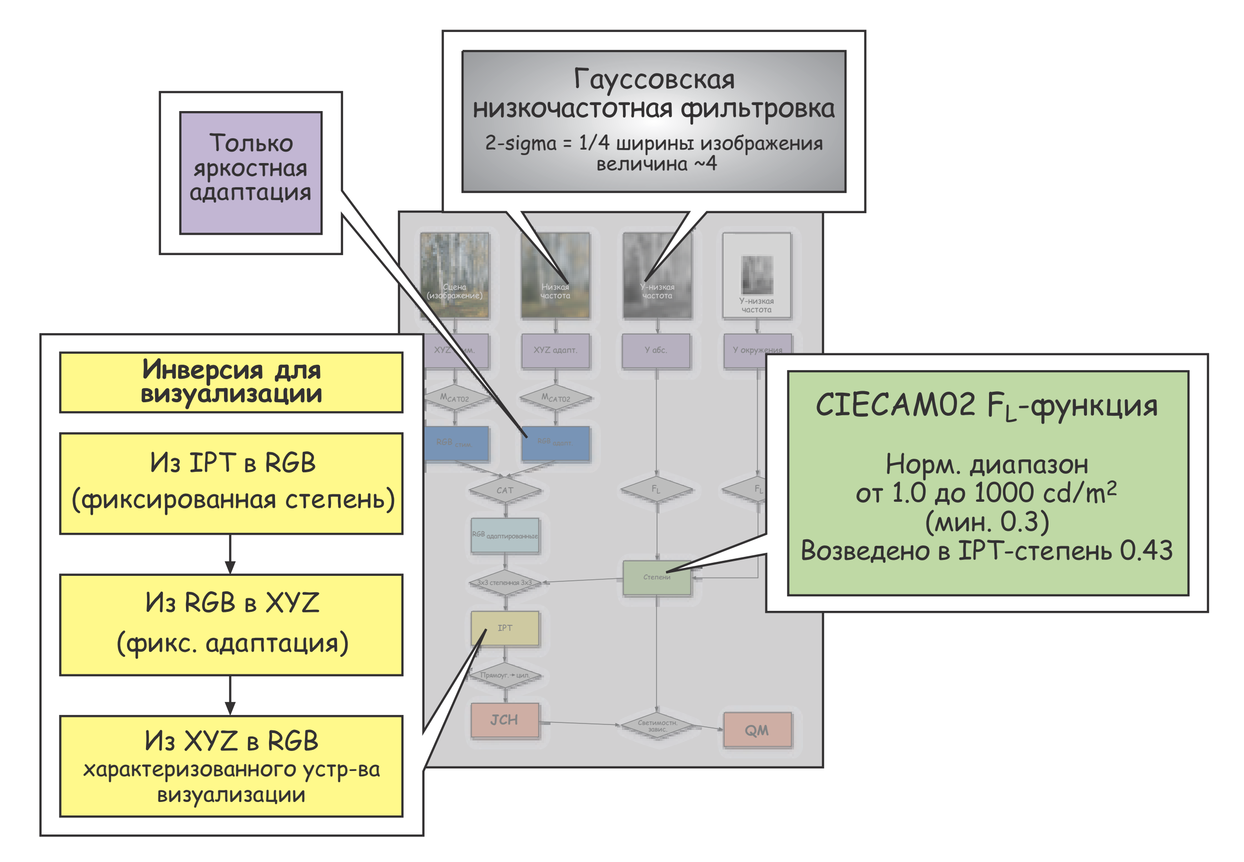


Рис. 20.3 Функциональные узлы iCAM, отвечающие за тоновый мэппинг HDR-изображений.

не выработаны, вполне удовлетворительные результаты можно получить, если использовать установки, показанные на рис. 20.3 (детали см. у Джонсона и Фершильда [2003]).

iCAM успешно применяется для прогнозирования различных феноменов цветового восприятия (хроматической адаптации [согласованные цветовые стимулы], постоянства цветового тона, симультанного контраста, оконтуривания и смазывания) и его шкалирования (Фершильд и Джонсон, 2002).

Задействованный в iCAM расчет смены хроматической адаптации такой же, что и в CIECAM02, и работает он только в отношении тех ситуаций, при которых меняется статус хроматической адаптации (то есть при смене белой точки). В свое время TC8-01 потратил множество усилий на то, чтобы разработать данный расчет, и ясно, что не существует никакой иной модели с лучшим его исполнением (хотя и имеются эквивалентные варианты). Таким образом, модель смены хроматической адаптации, заложенная в iCAM — это лучшее, что есть сегодня.

Шкалы восприятия

При эталонных условиях просмотра шкалы восприятия iCAM-модели идентичны *IPT*-шкалам. Отметим также, что по сравнению с иными пространствами восприятия *IPT* сегодня является лучшим по контурам постоянного цвето-

вого тона (что радикально облегчает работу алгоритмов гамут-мэппинга и повышает их точность). К тому же, предикторы светлоты и насыщенности в iCAM весьма точны и вполне сопоставимы с таковыми у лучших моделей цветового восприятия (при работе в типичных условиях просмотра). Сказанное справедливо также и в отношении субъективной яркости и полноты цвета.

В экстремальных условиях просмотра работа iCAM (равно как и работа иных моделей) начинает ухудшаться, однако же именно экстремальные условия просмотра позволяют выявить весь потенциал модели. Чтобы «научить» iCAM работать в экстремальных условиях, по этим условиям понадобятся дополнительные экспериментальные данные.

Оценка цветовых отличий

Оценка цветовых отличий в iCAM аналогична таковой в CIELAB (поскольку при эталонных условиях просмотра оба пространства весьма схожи друг с другом), и, таким образом, процедура вычисления цветовых отличий заурядна, но может быть улучшена за счет использования CIE94-формул (использование CIEDE2000 в iCAM не рекомендуется, поскольку эти формулы очень сложны и подогнаны под специфические недостатки CIELAB-пространства, в частности под недостоверность контуров постоянного цветового тона).

Симультанный контраст

Симультанный контраст (или индукция) смещает восприятие стимула в ту или иную сторону (по оппонентным осям) в зависимости от цвета фона: на рис. 20.4 показан стимул, демонстрирующий светлотный симультанный контраст (серые квадратики на всех трех фонах физически идентичны), а также его прогноз, выполненный iCAM (прогноз представлен iCAM-предиктором светлоты). Отметим, что высокой точности данного прогноза содействует учет эффектов локальной адаптации.

Оконтуривание

Оконтуривание — это феномен, при котором цветовые отличия между двумя стимулами оказываются перцепционно больше, если цвет фона подобен цвету самих стимулов: на рис. 20.5 показан стимул, демонстрирующий оконтуривание по насыщенности и ее прогноз, выполненный iCAM (прогноз представлен предиктором насыщенности). Отметим, что точности данного прогноза содействует учет эффектов локальной адаптации.

Смазывание

Смазывание — это пространственный феномен цветового восприятия, при котором общий цветовой тон пространственно-сложных областей изображения заполняет собой смежные участки. Рис. 20.6 предлагает пример смазывания, при котором красный цветовой тон решетки кольца «растекается» на все коль-

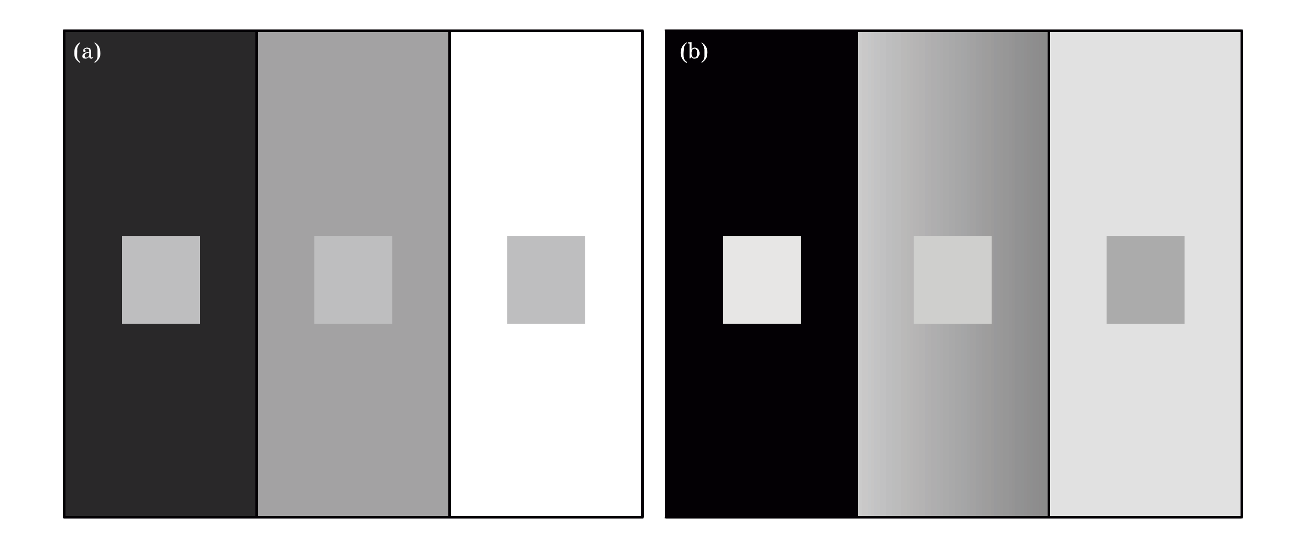


Рис. 20.4 (a) — оригинальный стимул; (b) — iCAM J-карта (светлотная), иллюстрирующая прогноз симультанного контраста.

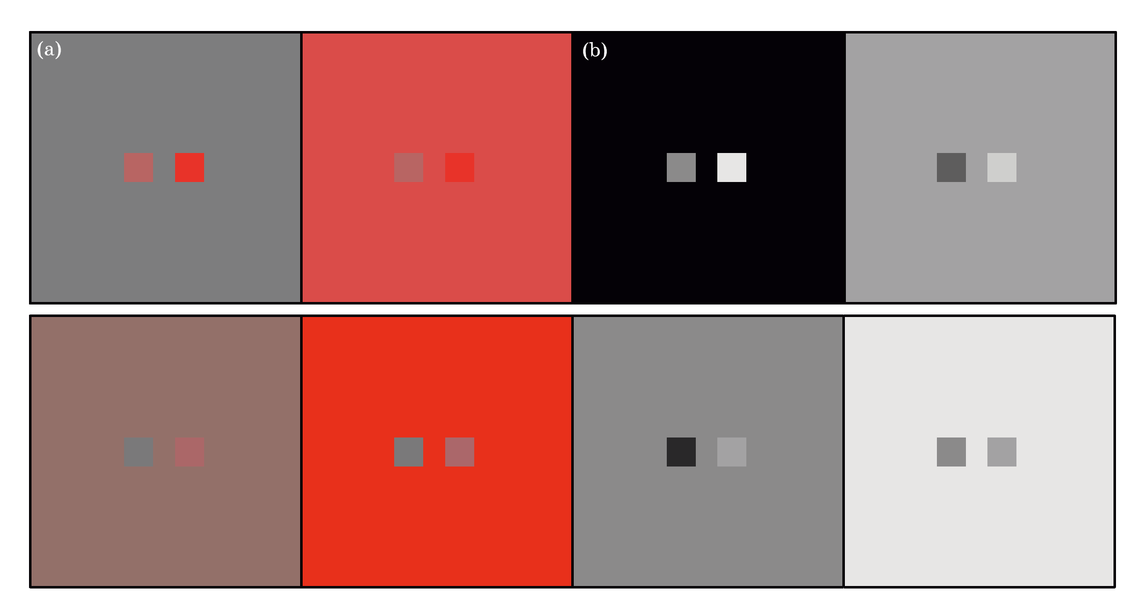


Рис. 20.5 (a) — оригинальный стимул; (b) — iCAM C-карта, иллюстрирующая прогноз оконтуривания по насыщенности.
Оригинал взят с www.hpl.hp.com/personal/Nathan_Moroney/.

цо. Отметим, что прогноз смазывания — это интегральная картина прогнозов цветовых тонов по всем элементам изображения.

Точности прогноза смазывания способствует пространственная фильтрация, выполняемая iCAM.

Визуализация HDR-изображений

Одной из наиболее интересных областей применения iCAM является воспроизведение HDR-изображений (число которых сегодня стремительно растет) на

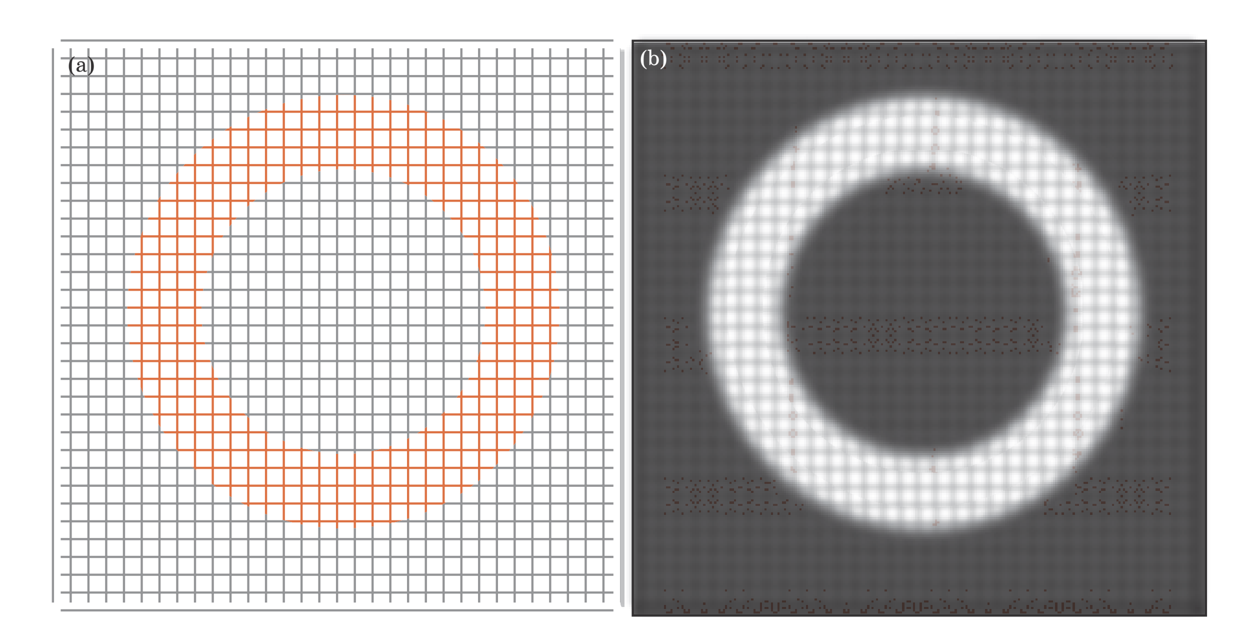


Рис. 20.6 (a) — оригинальный стимул; (b) — iCAM h-карта (по цветовому тону), иллюстрирующая прогноз смазывания.

системах с низким динамическим диапазоном. Изначально HDR-изображения были получены путем компьютерной имитации, то есть были рассчитаны с помощью т.н. алгоритма общей освещенности (методы трассировки луча или моделирования световых потоков) или с помощью регистрации изображений путем многократного экспонирования (диапазон яркостей реальных сцен, особенно тех, в которых виден источник освещения, часто превышает шесть порядков).[1]

Следует отметить, что в последнее время стали широко доступны промышленные цифровые системы, способные сравнительно легко регистрировать HDR-данные, благодаря чему пользователи цифровых камер в самое ближайшее время получат возможность фиксировать сцены с огромными динамическими диапазонами. К сожалению, визуализация и использование HDR-данных еще долго будет затруднена, поскольку цветовоспроизводящие системы (даже высшего качества) ограничены динамическим диапазоном 2D.

Одним из подходов к решению проблемы HDR-визуализации является т.н. интерактивная визуализация изображения, предполагающая оперативный выбор тех его областей, что должны быть оптимально отображены данной системой. Отметим, однако, что метод применим лишь к мониторам, но никоим образом не к отпечаткам.

Еще одним ограничением HDR-визуализации является необходимость работы с данными, разрядность кодирования которых превышает 24 бит (8 бит на канал. — *Прим. пер.*) и которые часто имеют плавающую точку. Высокая раз-

---

[1] То есть больше, чем 6D. — *Прим. пер.*

рядность весьма желательна при прямой (то есть, не интерактивной) визуализации HDR-векторной графики, дабы обеспечить восприятие, сходное с восприятием реальных сцен; если же предполагается визуализация реалистичных изображений на отражающих носителях (печать) — высокая разрядность кодирования не просто желательна, но крайне необходима.

Паттанайк (1998) дает краткий обзор некоторых алгоритмов визуализации HDR-изображений, и стоит отметить, что ряд страниц посвящен весьма интересной системе SIGGRAPH 2002 (Фатталь и колл., 2002; Дуранд и Дорси, 2002; Рейнхард и колл., 2002).

Поскольку iCAM содержит блоки учета локальной адаптации и контроля локального контраста, и поскольку кодирование в зрительной системе человека имеет довольно низкий динамический диапазон, модель может быть использована для визуализации HDR-изображений.

Рис. 20.7 иллюстрирует использование iCAM для HDR-визуализации (взято с www.debevec.org). Изображения в левой колонке — линейная визуализация оригинальных HDR-значений (нормированных на энергетический максимум), демонстрирующая то, насколько данные оригинального диапазона выходят за границы типичной 24-битовой (8 бит на канал RGB) визуализации. К примеру, изображения верхнего ряда имеют динамический диапазон, превышающий 6D, т.к. через оконные витражи пробивается солнце.

Изображения средней колонки представляют результат стандартной визуализации HDR-данных с помощью т.н. интерактивного поиска оптимального степенного преобразования, именуемого также «гамма-коррекцией» (идею логарифмирования мы отметаем, поскольку результат будет почти таким же, как в первой колонке). К изображениям пришлось применить преобразование со степенью (гаммой), равной примерно 1/6 (в отличие от типичных 1/1.8 или 1/2.2), дабы «вытащить» детали из теней. Несмотря на то, что гамма-коррекция успешно визуализирует бо́льшую часть данных HDR-изображения, она имеет ряд существенных недостатков, а именно:

— требует обязательного участия пользователя;

— «выбеливает» (wash out) репродукцию, лишая ее достоверности и визуальной соотносимости с оригинальной сценой;

— способствует появлению в тенях изображения артефактов квантования (теневых шумов. — *Прим. пер.*).

Правая колонка демонстрирует результат обработки HDR-оригинала iCAM-моделью, выполнившей учет локальной адаптации и контроль локального контраста (см. рис. 20.3): на обоих изображениях динамический диапазон сцены сжат, дабы сделать ее тени видимыми и сохранить полноту цвета объектов. То есть, мы видим, что iCAM воспроизвела изображения как вполне приемлемые репродукции HDR-сцен (что эквивалентно результатам селективного недо-/переэкспонирования, от века применявшегося в традиционной фотопечати). Любопытно также и то, что изображения, визуализированные при помощи iCAM, были обсчитаны по автоматическому алгоритму, имитирующему человеческое восприятие, но исключающему интерактивное участие пользователя (Джонсон и Фершильд, 2003).



Рис. 20.7 Три HDR-изображения, взятых с www.debevec.org: изображения левой колонки иллюстрируют результат линейной визуализации HDR-данных; изображения средней колонки — результат ручной оптимизации путем степенного преобразования; изображения правой колонки иллюстрируют результат, полученный при автоматическом расчете, выполненном iCAM-моделью (см. рис. 20.3).

20.5 МЕТРИКА ОТЛИЧИЙ И МЕТРИКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Когда возникает необходимость оценить качество изображения, в структуре iCAM-модели требуются небольшие изменения, для того чтобы она могла создать специальную карту величины перцепционных отличий между двумя изображениями. При создании такой карты, в рамках линейного IPT-пространства выполняется пространственная фильтрация, зависящая от дистанции просмотра. Сами же отличия при этом вычисляются в обычном нелинейном IPT-пространстве. В качестве общей карты отличия изображений может быть использована эвклидова сумма отличий по осям IPT-пространства с последующей итоговой статистической обработкой данных (позволяющей прогнозиро-

вать различные атрибуты отличия изображений и атрибуты их качества). Схематично данный процесс показан на рис. 20.8, а его детальное описание см. у Джонсона и Фершильда (2003).

Из метрики отличия изображений (основанной на обычных уравнениях цветовых отличий, примененных к пространственно-фильтрованным сложным стимулам) может быть получена метрика их качества, и отметим, что данный подход был успешно использован для получения величин, характеризующих качество изображений (Джонсон и Фершильд, 2001). Такой вариант решения эквивалентен, а в целом даже лучше, чем тот, что получен с использованием иных цветовых пространств, оптимизированных для решения данной задачи (Джонсон и Фершильд, 2001).

Рис. 20.9 демонстрирует прогноз отличий в визуальной резкости (Джонсон и Фершильд, 2000) и визуальном контрасте (Калабрия и Фершильд, 2002).

По контрасту: результаты, показанные на рис. 20.9 (а), получены путем шкалирования визуального контраста разносюжетных изображений, подвергавшихся различным преобразованиям (Фершильд и Джонсон, 2003). По осям абсцисс отложены величины визуального контраста (усредненные данные), по осям ординат — предикторы визуального контраста, рассчитанные iCAM. Идеальный результат должен четко укладываться в V-образную фигуру с одинаковым наклоном обоих «крыльев», и фактический график свидетельствует о том,

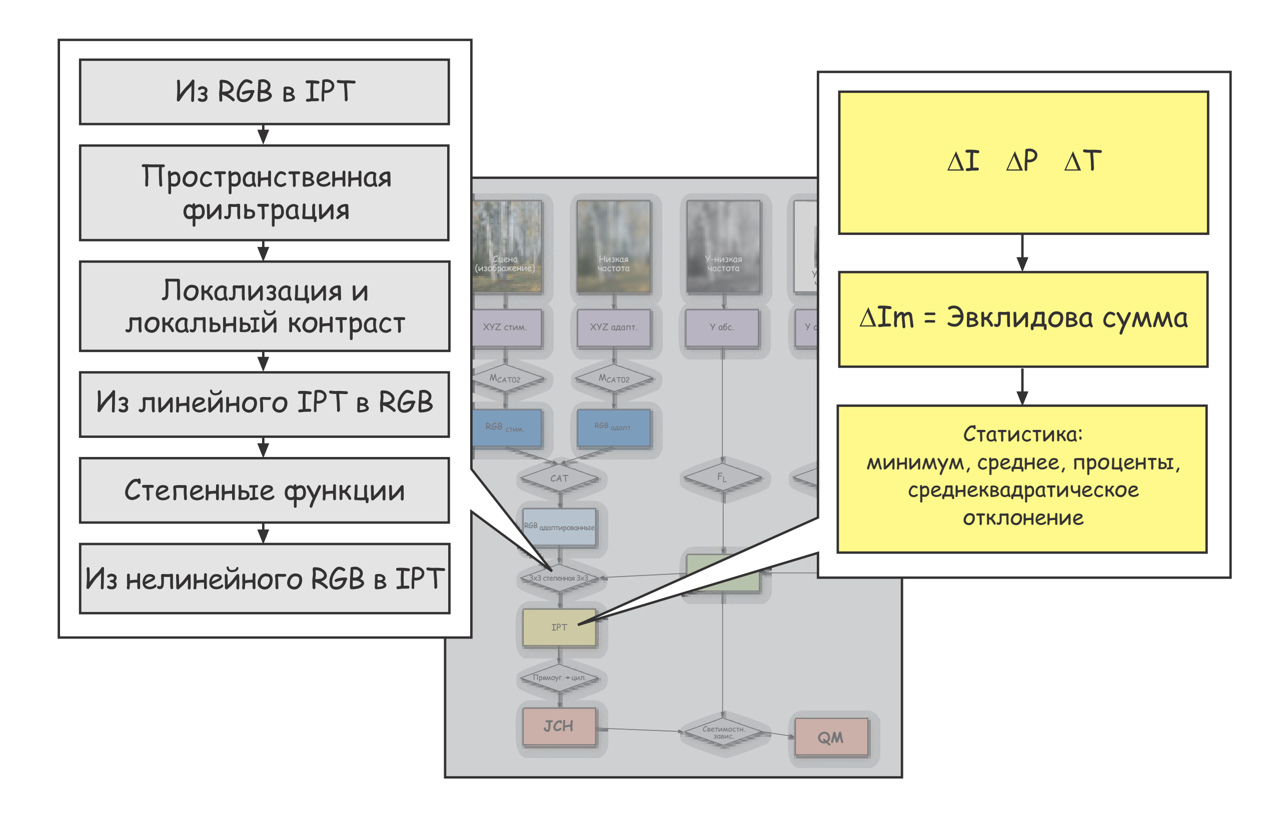


Рис. 20.8 Функциональные узлы iCAM, отвечающие за метрику отличия и метрику качества изображений.

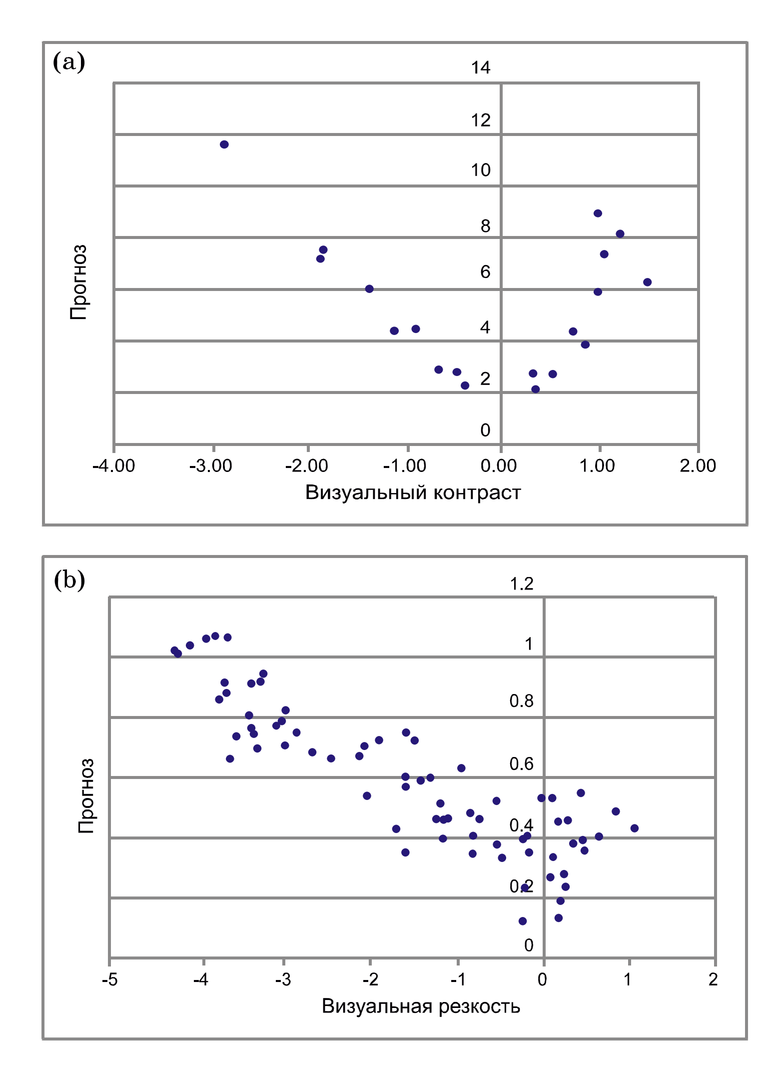


Рис. 20.9 Отличие изображений, подвергшихся различным преобразованиям, как функция от визуального контраста (a) и от визуальной резкости (b). Отметим, что коль скоро по оси абсцисс отложены визуальные данные, а по оси ординат — предикторы iCAM, то при идеально точном прогнозе точки распределились бы строго V-образно.

что iCAM весьма успешно справляется с задачей прогнозирования визуальных контрастов.

По резкости: результаты, демонстрируемые рис. 20.9 (b), были получены аналогичным образом, но с использованием существенно большего числа разносюжетных изображений и вариантов манипуляций с ними (Джонсон и Фершильд, 2000): наблюдателей просили прошкалировать визуальную резкость, а результаты конвертировались в интервальную шкалу, в нулевой позиции которой находилась резкость оригинала. Данные оказались весьма вариабельными, но как видно из рис. 20.9 (b), результаты вновь оказались хорошо спрогнозированными.

Детали, исходную программу и текущие усовершенствования iCAM-модели можно найти на www.cis.rit.edu/mcsl/iCAM.

20.6 ТЕКУЩЕЕ ПОЛОЖЕНИЕ ДЕЛ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Как уже было сказано, в течение шести лет, прошедших с момента первого издания нашей книги, конструкции, методики тестирования и методики применения моделей цветового восприятия прошли путь интенсивного развития. Несмотря на то, что моделирование цветового восприятия остается областью активного научного исследования, общей стратегией дальнейшего развития является моделирование восприятия изображений (о котором идет речь в текущей главе): традиционные модели цветового восприятия (такие, как CIECAM02) достаточно развиты и дальнейший прогресс требует появления моделей нового типа.

В текущем разделе мы будем говорить о том, как будут разворачиваться события в обозримом будущем (они будут рассмотрены по тем же параметрам, что и в первом издании нашей книги).

Единая модель цветового восприятия?

Вопрос: Появится ли когда-нибудь единая модель цветового восприятия, которая будет абсолютно универсальной и пригодной для всех мыслимых ситуаций?

Ответ: Однозначно — никогда! Проблема моделирования цветового восприятия слишком сложна, чтобы одна общая модель могла стать решением всех возможных задач: даже спецификация цветовых отличий и та предполагает использование двух цветовых пространств (CIELAB и CIELUV), то есть: несмотря на то, что для метрики цветовых отличий явно предпочтительнее CIELAB , одной общей формулой не обойтись, и уж тем паче нет оснований ожидать единой спецификации на модель цветового восприятия.

Мы знаем, что усилия CIE по созданию CIECAM97s и CIECAM02 были весьма успешны и, обеспечив методическое единство промышленной оценки цветового восприятия, явились серьезным шагом к утверждению общего стандарта его спецификации. Благодаря деятельности CIE использование моделей цветового восприятия существенно упростилось, однако, конечно же, никто не говорит о том, что для специфических ситуаций не должны разрабатываться (и использоваться) иные модели. Есть все основания ожидать, что использование моделей цветового восприятия рано или поздно достигнет уровня сегодняшней спецификации цветовых отличий или уровня цветовых координатных систем.

Прочие модели цветового восприятия

Наша книга основана на моделях Ханта, Наятани, CIELAB, RLAB и CIECAM97s/CIECAM02 как на ключевых моделях цветового восприятия, доступных для широкого употребления. Перечисленные модели охватывают весь диапазон сегодняшних целевых сфер и тех, что могут появиться в обозримом будущем. Крайне маловероятно, что в ближайшее время будут созданы и опубликованы какие-то иные модели цветового восприятия (скорее всего упомянутые модели будут вовлечены в процесс дальнейшего развития и сравни-

тельного тестирования CIECAM02), а новым поколением моделей, как уже было сказано, явятся модели восприятия изображений, такие, как, к примеру, iCAM.

Текущее научное тестирование моделей

В последнее время интерес к моделям цветового восприятия, и особенно к применению их на практике, существенно возрос. Возросло и число исследований, посвященных оценке качества этих моделей: работа ведется по грантам, корпоративным заказам и выполняется как академическими исследователями, так и отраслевыми специалистами (а также различными техническими комитетами CIE [см. гл. 17]).

В ближайшие годы интерес ученых, вероятнее всего, сместится в сторону оценки эффективности применения моделей цветового восприятия в реальных ситуациях (в первую очередь таких, как ICC-аппаратно-независимое цветовоспроизведение), а результатом тестирования моделей должен явиться практический стандарт на моделирование цветового восприятия. Вполне возможно, что самый простой уровень моделирования, например, фонкризовский расчет смены адаптации, окажется вполне удовлетворительным, если имеют место четкий контроль и спецификация условий просмотра, а также достаточная точность аппаратной характеризации. Вместе с тем сказанное является непосредственной предпосылкой к использованию развитых моделей цветового восприятия.

Аналогия дальнейшего развития моделей цветового восприятия усматривается в спецификации функций цветового соответствия для Стандартного колориметрического наблюдателя CIE 1931: кривые сложения появились более 70 лет назад и вполне успешно применяются в промышленности по сей день. Однако исследования по выявлению более точных функций соответствия (а также их вариабельности) продолжаются и сейчас: сравнительно недавно в классических CIE-функциях были обнаружены некоторые систематические ошибки, критичные для ряда ситуаций (в которых пока вынужденно используются некие альтернативные кривые), но выявленные недостатки, как мы знаем, не послужили поводом к отказу от классических кривых сложения. Вполне возможно, что подобный путь уготован и моделям цветового восприятия: если CIECAM02 получит широкое признание и начнет активно применяться, ее критическое исследование (а также исследование прочих моделей, описанных в данной книге) будет продолжаться. И если кто-то предложит модификацию, реально улучшающую практическую работу модели, эта модификация будет незамедлительно принята. Впрочем, радикальных изменений не произойдет до тех пор, пока не будет решен ряд других основополагающих проблем, в первую очередь таких, как точность характеризации и контроль за условиями просмотра.

Текущее положение дел

В первом издании нашей книги утверждалось: «Интересным направлением развития моделей цветового восприятия в ближайшем будущем, вероятно,

явится учет пространственных и временных эффектов восприятия. Ряд проблем, с которыми придется столкнуться, описан у Ванделла (1993), Поирсона и Ванделла (1993, 1996), а также Бёмля и Ванделла (1996)». Так в итоге и произошло (о чем свидетельствуют предыдущие разделы данной главы): исследования по описанным направлениям продолжаются, а модели цветового восприятия — совершенствуются.

В первом издании также шла речь об использовании нейронных сетей: «Другим подходом к прогнозированию феноменов цветового восприятия является использование моделей нейронных сетей: Куртни и колл. (1995) дают интересный пример такого подхода». Сегодня, как мы видим, от идеи нейронных сетей практически отказались.

Общая схема действий

Статус моделей цветового восприятия сегодня таков, что при решении той или иной практической задачи неизбежно возникает вопрос: «Как следует поступать в данном случае?». Ответ базируется на описанных в нашей книге состоянии моделей восприятия и методиках их тестирования.

Первое, о чем нужно помнить, — это то, что модель цветового восприятия используется тогда, когда она однозначно необходима: если имеется возможность уравнять условия просмотра оригинала и репродукции для того, чтобы уйти от каких-либо расчетов смены восприятия, то такой возможностью непременно стоит воспользоваться; если же необходимость в использовании полной модели цветового восприятия очевидна, то лучшим выбором, вероятно, явится хантовская модель; однако когда высокий уровень организации модели не требуется — показано использование CIECAM02 (а в некоторых ситуациях в качестве модели цветового восприятия успешно выступит даже CIELAB).

Наилучшей общей рекомендацией явится цепь шагов от простого к сложному: движение продолжается до тех пор, пока текущая цветорепродукционная задача не будет решена. Стоит отметить также, что поскольку между моделями цветового восприятия имеются существенные идеологические и функциональные отличия, нельзя даже пытаться смешивать или согласовывать их между собой.

Ниже мы приводим общую схему действий (расположенных в порядке возрастания сложности), но прежде отметим, что чем выше уровень организованности используемой модели, тем более тщательным должен быть контроль условий просмотра.

- ⇨ Если имеется возможность, то крайне желательно уравнять условия просмотра оригинала и его репродукции, дабы соответствия по трехстимульным значениям явились бы соответствиями по восприятию.

- ⇨ Если необходимо изменить белую точку носителя, то в качестве первого приближения модели восприятия может быть использовано CIELAB.

- ⇨ Если обнаружится, что CIELAB неадекватно поставленной задаче, оно

может быть усовершенствовано за счет фонкризовского преобразования колбочковых ответов по фактическим условиям просмотра в колбочковые ответы по эталонным условиям просмотра. Оптимальным вариантом преобразования является $\mathbf{M}_{CAT02}$-матрица.

- ⇨ Если возникает необходимость в использовании более гибкой модели (к примеру, при переходе от экранного изображения к его твердой копии) и/или необходимость в изменении окружения, то показано использование оригинальной версии RLAB. Для оптимизации результатов расчет смены адаптации, «зашитый» в RLAB, также может быть заменен на $\mathbf{M}_{CAT02}$.
- ⇨ Если условия просмотра (и сам стимул) требуют использования полной модели цветового восприятия (или же прогнозирования субъективной яркости и полноты цвета) — показано использование CIECAM02.
- ⇨ Наконец, если прогноз всех известных феноменов цветового восприятия необходим в широком диапазоне условий просмотра (к примеру, очень высокая или низкая яркости, палочковый ответ) — должна применяться модель Ханта.

ЛИТЕРАТУРА

1 I. Abramov, J. Gordon, and H. Chan, Color appearance across the retina: effects of a white surround, J. Opt. Soc. Am. A 9, 195–202 (1992).

2 E.H. Adelson, Perceptual organization and the perception of brightness, Science 2, 2042–2044 (1993)

3 Adobe Systems Incorporated, PostScript® Language Reference Manual, 2nd. Ed., Addison-Wesley, Reading, Mass. (1990).

4 J. Albers, Interaction of Color, Yale University Press, New Haven, (1963).

5 P.J. Alessi, CIE guidelines for coordinated research on evaluation of colour appearance models for reflection print and self-luminous display comparisons, Color Res ppl. 19, 48–58 (1994).

6 R.L. Alfvin and M.D. Fairchild, Observer variability in metameric color matches using color reproduction media, Color Res. Appl. 22, 174–188 (1997).

7 D.H. Alman, R.S. Berns, G.D. Snyder, and W.A. Larson, Performance testing of colordifference metrics using a color tolerance dataset, Color Res. Appl. 14, 139–151 (1989).

8 M. Anderson, S. Chandrasekar, R. Motta, and M. Stokes, Proposal for a standard color space for the internet — sRGB, IS&T/SID 4th Color Imaging Conference, Scottsdale, 238–246 (1996)

9 ANSI PH2.30-1989, American National Standard for Graphic Arts and Photography — Color Prints, Transparencies, and Photomechanical Reproductions — Viewing Conditions, American National Standards Institute, New York, (1989).

10 L.E. Arend and A. Reeves, Simultaneous color constancy, J. Opt. Soc. Am. A 3, 1743–1751 (1986).

11 L.E. Arend and R. Goldstein, Simultaneous constancy, lightness and brightness, J. Opt. Soc. Am. A 4, 2281–2285 (1987).

12 L.E. Arend and R. Goldstein, Lightness and brightness over spatial illumination gradients, J. Opt. Soc. Am. A 7, 1929–1936 (1990).

13 L.E. Arend, A. Reeves, J. Schirillo, and R. Goldstein, Simultaneous color constancy: papers with diverse Munsell values, J. Opt. Soc. Am. A 8, 661–672 (1991).

14 L.E. Arend, How much does illuminant color affect unattributed colors?, J. Opt. Soc m. A 10, 2134–2147 (1993)

15 ASTM, Standard Terminolgy of Appearance, E284-95a (1995)

16 ASTM, Standard Guide for Designing and Conducting Visual Experiments, E1808-96 (1996)

17 ATIS, Objective perceptual video quality measurement using a JND-based full reference technique, Alliance for Telecommunications Industry Solutions Technical Report T1.TR.PP.75-2001, (2001).

18 M. Ayama, T. Nakatsue, and P.K. Kaiser, Constant hue loci of unique and binary balanced hues at 10, 100, and 1000 td, J. Opt. Soc. Am., A 4, 1136–1144 (1987).

19 J.S. Babcock, J.B. Pelz and M.D. Fairchild, Eye tracking observers during color image evaluation tasks, SPIE/IS&T Electronic Imaging Conference, SPIE Vol. 5007, Santa Clara, 218–230 (2003).

20 W.G.K. Backhaus, R. Kliegl, and J.S. Werner, Eds., Color Vision: Perspectives from Different Disciplines, Walter de Gruyter, Berlin, (1998).

21 H.B. Barlow and J.D. Mollon, The Senses, Cambridge Universtiy Press, Cambridge, (1982).

22 K. Barnard and B. Funt, Analysis and improvement of multi-scale retinex, Proceedings of the 5th IS&T/SID Color Imaging Conference, Scottsdale, 221–226 (1997).

23 C.J. Bartleson, Memory colors of familiar objects, J. Opt. Soc. Am., 50, 73–77 (1960).

24 C.J. Bartleson and E.J. Breneman, Brightness perception in complex fields, J. Opt. Soc. Am., 57, 953–957 (1967).

25 C.J. Bartleson, Optimum image tone reproduction, J. SMPTE 84, 613–618 (1975).

26 C.J. Bartleson, Brown, Color Res. Appl. 1, 181–191 (1976).

27 C.J. Bartleson, A review of chromatic adaptation, AIC Proceedings, Color 77, 63–96 (1978).

28 C.J. Bartleson and F. Grum, Optical Radiation Measurements Vol 5: Visual Measurements, Academic, Orlando (1984).

29 K.-H. Bauml and B.A. Wandell, Color appearance of mixture gratings, Vision Res. 36, 2894–2864 (1996).

30 K.H. Bauml, Simultaneous color constancy: how surface color perception varies with the illuminant, Vision Res. 39, 1531–1550 (1999)

31 A. Berger-Schunn, Practical Color Measurement, Wiley, New York (1994).

32 R.S. Berns, The mathematical development of CIE TC1-29 proposed color difference equation: CIELCH, AIC Proceedings, Color 93, C19-1 (1993a).

33 R.S. Berns, Spectral modeling of a dye diffusion thermal transfer printer, J. Electronic Imaging 2, 359–370 (1993b).

34 R.S. Berns, R.J. Motta, and M.E. Gorzynski, CRT colorimetry, part I: Theory and practice, Color Res. Appl. 18, 299–314 (1993a).

35 R.S. Berns, M.E. Gorzynski, and R.J. Motta, CRT colorimetry, part II: Metrology, Color Res. Appl. 18, 315–325 (1993b).

36 R.S. Berns and M.J. Shyu, Colorimetric characterization of a desktop drum scanner using a spectral model, J. Electronic Imaging 4, 360–372 (1995).

37 R.S. Berns, Methods for characterizing CRT displays, Displays 16, 173–182 (1996).

38 R.S. Berns, A generic approach to color modeling, Color Res. Appl. 22, 318–325 (1997).

39 R.S. Berns, Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology, 3rd. Ed., John Wiley & Sons, New York (2000).

40 R.S. Berns, S.R. Fernandez, and L. Taplin, Estimating black-level emissions of computer-controlled displays, Color Res. Appl. 28, 379–383 (2003).

41 K.T. Blackwell and G. Buchsbaum, The effect of spatial and chromatic parameters on chromatic induction, Color Res. Appl. 13, 166–173 (1988a).

42 K.T. Blackwell and G. Buchsbaum, Quantitative studies in color constancy, J. Opt. Soc. Am. A 5, 1772–1780 (1988b).

43 C. Blakemore and F.W. Campbell, On the existence of neurons in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images, J. of Physiology 203, 237–260 (1969).

44 B. Blakeslee and M.E. McCourt, A multiscale spatial filtering account of the White effect, simultaneous brightness contrast and grating induction, Vision Res. 39, 4361–4377 (1999).

45 R.M. Boynton, Human Color Vision, Optical Society of America, Washington, (1979).

46 R.M. Boynton, History and current status of a physiologically based system of photometry and colorimetry, J. Opt. Soc. Am. A 13, 1609–1621 (1996).

47 D.H. Brainard and B.A. Wandell, Analysis of the retinex theory of color vision, J. Opt. Soc. Am. A 3, 1651–1661 (1986).

48 D.H. Brainard and B.A. Wandell, Asymmetric color matching: how color appearance depends on the illuminant, J. Opt. Soc. Am. A 9, 1433–1448 (1992).

49 G.J. Braun and M.D. Fairchild, Image lightness rescaling using sigmoidal contrast enhancement functions, J. of Electronic Imaging 8, 380–393 (1999a).

50 G.J. Braun and M.D. Fairchild, General-purpose gamut-mapping algorithms: Evaluation of contrast-preserving rescaling functions for color gamut mapping, IS&T/SID 7th Color Imaging Conference, Scottsdale, 167–192 (1999b).

51 G.J. Braun and M.D. Fairchild, General-purpose gamut-mapping algorithms: Evaluation of contrast-preserving rescaling functions for color gamut mapping, J. Im. Sci. and Tech. 44, 343–350 (2000).

52 K.M. Braun and M.D. Fairchild, Evaluation of five color-appearance transforms across changes in viewing conditions and media, IS&T/SID 3rd Color Imaging Conference, Scottsdale, 93–96 (1995).

53 K.M. Braun, M.D. Fairchild, and P.J. Alessi, Viewing environments for cross-media image comparisons, Color Res. Appl. 21, 6–17 (1996).

54 K.M. Braun and M.D. Fairchild, Testing five color appearance models for changes in viewing conditions, Color Res. Appl. 21, 165–174 (1997).

55 K.M. Braun and M.D. Fairchild, Psychophysical generation of matching images for cross-media color reproduction, J. Soc. Info. Disp. 8, 33–44 (2000).

56 E.J. Breneman, Corresponding chromaticities for different states of adaptation to complex visual fields, J. Opt. Soc. Am. A 4, 1115–1129 (1987).

57 P. Bressan, Revisitation of the luminance conditions for the occurrence of the achromatic neon color spreading illusion, Perception & Psychophysics 54, 55–64 (1993).

58 H. Brettel, F. Vienot, and J.D. Mollon, Computerized simulation of color appearance for dichromats, J. Opt. Soc. Am. A 14, 2647–2655 (1997).

59 M.H. Brill and G. West, Chromatic adaptation and color constancy: A possible dichotomy, Color Res. Appl. 11, 196–227 (1986).

60 M.H. Brill, Color management: New roles for color transforms, IS&T/SID 5th Color Imaging Conference, Scottsdale, 78–82 (1997)

61 .J. Calabria and M.D. Fairchild, Herding CATs: A comparison of linear chromaticadaptation transforms for CIECAM97s, IS&T/SID 9th Color Imaging Conference, Scottsdale, 174–178 (2001)

62 .J. Calabria and M.D. Fairchild, Compare and contrast: Perceived contrast of color images, Proc. of IS&T/SID 10th Color Imaging Conference, 17–22 (2002).

63 F.W. Campbell and J.G. Robson, Application of Fourier analysis to the visibility of gratings, J. of Physiology 197, 551–566 (1968).

64 M.E. Chevreul, The Principles of Harmony and Contrast of Colors, (1839). (Reprinted, Van Nostrand Reinhold, New York, 1967).

65 E.-J. Chichilnisky and B.A. Wandell, Photoreceptor sensitivity changes explain color appearance shifts induced by large uniform backgrounds in dichoptic matching, Vision Res. 35, 239–254 (1995).

66 CIE, Colorimetry, CIE Publ. No. 15.2, Vienna (1986).

67 CIE, International Lighting Vocabulary, CIE Publ. No. 17.4, Vienna (1987).

68 CIE, Special Metamerism Index: Change in Observer, CIE Publ. No. 80, Vienna (1989).

69 CIE, CIE 1988 2° Spectral Luminous Efficiency Function for Scotopic Vision, CIE Publ. No. 86, Vienna (1990).

70 CIE, A Method of Predicting Corresponding Colours under Different Chromatic and Illuminance Adaptations, CIE Tech. Rep. 109, Vienna (1994).

71 CIE, Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, CIE Publ. No. 13.3, Vienna (1995a).

72 CIE, Industrial Colour-Difference Evaluation, CIE Tech. Rep. 116, Vienna (1995b).

73 CIE, Report to CIE Division 1 from TC1-31 Colour Notations and Colour-Order Systems, (1996a).

74 CIE, CIE Expert Symposium ’96 Color Standards for Image Technology, CIE Pub. x010, Vienna (1996b).

75 CIE, The CIE 1997 Interim Colour Appearance Model (Simple Version), CIECAM97s, CIE Pub. 131 (1998).

76 CIE, CIE Collection/Colour Rendering (TC1-33 Closing Remarks), CIE Pub. 135/2 rendering (1999).

77 CIE, Improvement to Industrial Colour difference Evaluation, CIE Pub 142 (2001).

78 CIE, CIE TC1-52 Technical Report, A Review of Chromatic Adaptation Transforms (2003).

79 CIE, CIE TC8-01 Technical Report, A Colour Appearance Model for Color Management Systems: CIECAM02, CIE Pub. 159 (2004).

80 F.J.J. Clarke, R. McDonald, and B. Rigg, Modification to the JPC 79 colour-difference formula, J. Soc. Dyers Colourists 100, 128–132 (1984).

81 J.B. Cohen, Visual Color and Color Mixture: The Fundamental Color Space, University of Illinois Press, Urbana (2001).

82 F.W. Cornelissen and E. Brenner, On the role and nature of adaptation in chromatic induction, Channels in the Visual Nervous System: Neurophysiology, Psychophysics and Models, B. Blum, Ed., Freund Publishing, London, 109–123 (1991).

83 F.W. Cornelissen and E. Brenner, Simultaneous colour constancy revisted: An analysis of viewing strategies, Vision Res. 35, 2431–2448 (1995).

84 S.M. Courtney, L.H. Finkel, and G. Buchsbaum, A multistage neural network for color constancy and color induction, IEEE Trans. on Neural Networks 6, 972–985 (1995a).

85 S.M. Courtney, L.H. Finkel, and G. Buchsbaum, Network simulations of retinal and cortical contributions to color constancy, Vision Res. 35, 413–434 (1995b).

86 B.J. Craven and D.H. Foster, An operational approach to color constancy, Vision Res. 32, 1359–1366 (1992).

87 S. Daly, The Visible Differences Predictor: An algorithm for the assessment of image fidelity, in Digital Images and Human Vision, A. Watson, Ed., MIT, Cambridge, 179– 206 (1993).

88 J. Davidoff, Cognition Through Color, MIT Press, Cambridge, (1991).

89 P.B. Delahunt and D.H. Brainard, Control of chromatic adaptation: Signals from separate cone classes interact, Vision Res. 40, 2885–2903 (2000).

90 G. Derefeldt, Colour appearance systems, Chapter 13 in The Pereception of Colour, P. Gouras, Ed., CRC Press, Boca Raton, 218–261 (1991).

91 R.L. DeValois, C.J. Smith, S.T. Kitai, and S.J. Karoly, Responses of single cells in different layers of the primate lateral geniculate nucleus to monochromatic light, Science 127, 238–239 (1958).

92 R.L. DeValois and K.K. DeValois, Spatial Vision, Oxford University Press, Oxford (1988).

93 P. De Weerd, R. Desimone, and L.G. Ungerleider, Perceptual filling-in: a parametric study, Vision Res. 38, 2721–2734 (1998).

94 M.S. Drew and G.D. Finlayson, Device-independent color via spectral sharpening, IS&T/SID 2nd Color Imaging Conference, Scottsdale, 121–126 (1994).

95 F. Durand and J. Dorsey, Fast bilateral filtering for the display of high-dynamicrange images, Proceedings of SIGGRAPH 2002, San Antonio, 257–266 (2002).

96 M. D'Zmura and P. Lennie, Mechanisms of color constancy, J. Opt. Soc. Am. A 3, 1662–1672 (1986).

97 F. Ebner, and M.D. Fairchild, Development and testing of a color space (IPT) with improved hue uniformity, IS&T/SID 6th Color Imaging Conference, Scottsdale, 8–13 (1998).

98 P.G. Engeldrum, Four color reproduction theory for dot formed imaging systems, J. Imag. Tech. 12, 126–131 (1986).

99 P.G. Engeldrum, Color scanner colorimetric design requirements, Proc. SPIE 1909, 75–83 (1993).

100 P.G. Engeldrum, A framework for image quality models, J. Imag. Sci. Tech. 39, 312–318 (1995).

101 P.G. Engeldrum, Psychometric Scaling: A Toolkit for Imaging Systems Development, Imcotek Press, Winchester (2000).

102 P.G. Engledrum, Extending image quality models, Proc IS&T PICS Conference, 65–69 (2002).

103 R.M. Evans, Visual processes and color photography, J. Opt. Soc. Am. 33, 579–614 (1943).

104 R.M. Evans, An Introduction to Color, John Wiley & Sons, New York, (1948).

105 R.M. Evans, W.T. Hanson, and W.L. Brewer, Principles of Color Photography, John Wiley & Sons, New York, (1953).

106 M.D. Fairchild, Chromatic Adaptation and Color Appearance, Ph.D. Dissertation, University of Rochester (1990).

107 M.D. Fairchild, A model of incomplete chromatic adaptation, Proceedings of the 22nd Session of the CIE (Melbourne) 33–34 (1991a).

108 M.D. Fairchild, Formulation and testing of an incomplete-chromatic-adaptation model, Color Res. Appl. 16, 243–250 (1991b).

109 M.D. Fairchild and E. Pirrotta, Predicting the lightness of chromatic object colors using CIELAB, Color Res. Appl. 16, 385–393 (1991).

110 M.D. Fairchild, Chromatic adaptation and color constancy, in Advances in Color Vision Technical Digest, Vol. 4 of the OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, D.C.), 112–114 (1992a).

111 M.D. Fairchild, Chromatic adaptation to image displays, TAGA 2, 803–824 (1992b).

112 M.D. Fairchild and P. Lennie, Chromatic adaptation to natural and artificial illuminants, Vision Res. 32, 2077–2085 (1992).

113 M.D. Fairchild, Chromatic adaptation in hard-copy/soft-copy comparisons, Color Hard Copy and Graphic Arts II, Proc. SPIE 1912, 47–61 (1993a).

114 M.D. Fairchild, Color Forum: The CIE 1931 Standard Colorimetric Observer: Mandatory retirement at age 65?, Color Res. Appl. 18, 129–134 (1993b).

115 M.D. Fairchild and R.S. Berns, Image color appearance specification through extension of CIELAB, Color Res. Appl. 18, 178–190 (1993).

116 M.D. Fairchild, E. Pirrotta, and T.G. Kim, Successive-Ganzfeld haploscopic viewing technique for color-appearance research, Color Res. Appl. 19, 214–221 (1994).

117 M.D. Fairchild, Some hidden requirements for device-independent color imaging, SID International Symposium, San Jose, 865–868 (1994a).

118 M.D. Fairchild, Visual evaluation and evolution of the RLAB color space, IS&T/SID 2nd Color Imaging Conference, Scottsdale, 9–13 (1994b).

119 M.D. Fairchild, Testing colour-appearance models: Guidelines for coordinated research, Color Res. Appl. 20, 262–267 (1995a).

120 M.D. Fairchild, Considering the surround in device-independent color imaging, Color Res. Appl. 20 352–363 (1995b).

121 M.D. Fairchild and R.L. Alfvin, Precision of color matches and accuracy of color matching functions in cross-media color reproduction, IS&T/SID 3rd Color Imaging Conference, Scottsdale, 18–21 (1995).

122 M.D. Fairchild and L. Reniff, Time-course of chromatic adaptation for colorappearance judgements, J. Opt. Soc. Am. A 12, 824–833 (1995).

123 M.D. Fairchild, R.S. Berns, and A.A. Lester, Accurate color reproduction of CRTdisplayed images as projected 35 mm slides, J. Elec. Imaging 5, 87–96 (1996).

124 M.D. Fairchild, Refinement of the RLAB color space, Color Res. Appl. 21, 338–346 (1996).

125 M.D. Fairchild and L. Reniff, A pictorial review of color appearance models, IS&T/SID 4th Color Imaging Conference, Scottsdale, 97–100 (1996).

126 M.D. Fairchild, Color Appearance Models, Addison Wesley, Reading (1998a).

127 M.D. Fairchild, The ZLAB color appearance model for practical image reproduction applications, Proceedings of the CIE Expert Symposium '97 on Colour Standards for Image Technology, CIE Pub. x014, 89–94 (1998b).

128 M.D. Fairchild, A revision of CIECAM97s for practical applications, Color Res. Appl. 26, 418–427 (2001).

129 M.D. Fairchild, Image quality measurement and modeling for digital photography, International Congress on Imaging Science '02, Tokyo, 318–319 (2002a).

130 M.D. Fairchild, Modeling color appearance, spatial vision, and image quality, Color Image Science: Exploiting Digital Media, Wiley, New York, 357–370 (2002b).

131 M.D. Fairchild and G.M. Johnson, Meet iCAM: A next-generation color appearance model, IS&T/SID 10th Color Imaging Conference, Scottsdale, 33–38 (2002).

132 M.D. Fairchild and G.M. Johnson, Image appearance modeling, Proc. SPIE/IS&T Electronic Imaging Conference, SPIE Vol. 5007, Santa Clara, 149–160 (2003).

133 M.D. Fairchild and G.M. Johnson, The iCAM framework for image appearance, image differences, and image quality, J. of Electronic Imaging 13, 126–138 (2004).

134 H.S. Fairman, Metameric correction using parameric decomposition, Color Res. Appl. 12, 261–265 (1987).

135 R. Fattal, D. Lischinski, and M. Werman, Gradient domain high dynamic range compression, Proceedings of SIGGRAPH 2002, San Antonio, 249–256 (2002).

136 G. Fechner, Elements of Psychophysics Vol I, (Translated by H.E. Adler), Holt, Rinehart, and Winston, New York (1966).

137 S. Fernandez and M.D. Fairchild, Observer preferences and cultural differences in color reproduction of scenic images, IS&T/SID 10th Color Imaging Conference, Scottsdale, 66–72 (2002).

138 G.D. Finlayson, M.S. Drew, and B.V. Funt, Spectral sharpening: Sensor transformations for improved color constancy, J. Opt. Soc. Am. A 11, 1553–1563 (1994a).

139 G.D. Finlayson, M.S. Drew, and B.V. Funt, Color constancy: Generalized diagonal transforms suffice, J. Opt. Soc. Am. A 11, 3011–3019 (1994b).

140 G.D. Finlayson and M.S. Drew, Positive Bradford curves through sharpening, IS&T/SID 7th Color Imaging Conference, Scottsdale, 227–232 (1999).

141 G.D. Finlayson and S. Susstrunk, Performance of a chromatic adaptation transform based on spectral sharpening, IS&T/SID 8th Color Imaging Conference, Scottsdale, 49–55 (2000).

142 D.J. Finney, Probit Analysis, 3rd Ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK (1971).

143 J.D. Foley, A. van Dam, S.K. Feiner, and J.F. Hughes, Computer Graphics: Principles and Practice, 2nd Ed., Addison-Wesley, Reading, Mass., (1990).

144 D.H. Foster and S.M.C. Nascimento, Relational colour constancy from invariant cone-excitation ratios, Proc. R. Soc. Lond. B 257, 115–121 (1994).

145 B. Fraser, C. Murphy and F. Bunting, Real World Color Management, Peachpit Press, Berkeley (2003).

146 K. Fuld, J.S. Werner, and B.R. Wooten, The possible elemental nature of brown, Vision Res. 23, 631–637 (1983).

147 B. Funt, F. Ciurea, and J.J. McCann, Retinex in Matlab, Proc. of IS&T/SID 8th Color Imaging Conference, 112–121 (2000).

148 K.R. Gegenfurtner and L.T. Sharpe, Color Vision: From Genes to Perception, Cambridge University Press, Cambridge (1999).

149 R.S. Gentile, E. Walowit, and J.P. Allebach, Quantization multilevel halftoning of color images for near-original image quality, J. Opt. Soc. Am. A 7, 1019–1026 (1990a).

150 R.S. Gentile, E. Walowit, and J.P. Allebach, A comparison of techniques for color gamut mismatch compensation, J. Imaging Tech. 16, 176 –181 (1990b).

151 G.A. Gescheider, Psychophysics: Method, Theory, and Application, 2nd. Ed., Lawrence Erlbaum Asociates, Hillsdale (1985)

152 A.L. Gilchrist, When does perceived lightness depend on perceived spatial arrangement?, Perception & Psychophysics 28, 527–538 (1980).

153 E. Giorgianni and T. Madden, Digital Color Management: Encoding Solutions, Addison-Wesley, Reading, Mass., (1997).

154 S. Gonzalez and M.D. Fairchild, Evaluation of bispectral spectrophotometry for accurate colorimetry of printing materials, IS&T/SID 8th Color Imaging Conference, Scottsdale, 39–43 (2000).

155 E.M. Granger, Uniform color space as a function of spatial frequency, SPIE/IS&T Electronic Imaging Conference, SPIE Vol. 1913, San Jose, 449–457 (1993).

156 E.M. Granger, ATD, appearance equivalence, and desktop publishing, SPIE Vol. 2170. 163–168 (1994).

157 E.M. Granger, Gamut mapping for hard copy using the ATD color apace, SPIE Vol. 2414. 27–35 (1995).

158 F. Grum and C.J. Bartleson, Optical Radiation Measurements Vol. 2, Color Measurment, Academic Press, New York (1980).

159 J. Guild, The colorimetric properties of the spectrum, Phil. Trans. Roy. Soc. A 230, 149–187 (1931).

160 S.L. Guth, Model for color vision and light adaptation, J. Opt. Soc. Am. A 8, 976–993 (1991).

161 S.L. Guth, ATD model for color vision I: Background, SPIE Vol. 2170. 149–152 (1994a).

162 S.L. Guth, ATD model for color vision II: Applications, SPIE Vol. 2170. 153–168 (1994b).

163 S.L. Guth, Further applications of the ATD model for color vision, SPIE Vol. 2414. 12–26 (1995).

164 J.C. Handley, Comparative analysis of Bradley–Terry and Thurstone–Mosteller paired comparison models for image quality assessment, IS&T PICS Conference Proceedings, Montreal, 108–112 (2001).

165 H. Haneishi, T. Suzuki, N. Shimoyama, and Y. Miyake, Color digital halftoning taking colorimetric color reproduction into account, J. Elec. Imaging 5, 97–106 (1996)

166 A. Hard and L. Sivik, NCS — Natural Color System: A Swedish standard for color notation, Color Res. Appl. 6, 129–138 (1981).

167 M.M. Hayhoe, N.I. Benimoff, and D.C. Hood, The time-course of multiplicative and subtractive adaptation processes, Vision Res. 27, 1981–1996 (1987).

168 M.M. Hayhoe, and M.V. Smith, The role of spatial filtering in sensitivity regulation, Vision Res. 29, 457–469 (1989).

169 H. V. Helmholtz, Handbuch der physiologischen Optick, 1st Ed. Voss, Hamburg (1866).

170 H. Helson, Fundamental problems in color vision. I. The principle governing changes in hue, saturation, and lightness of non-selective samples in chromatic illumination, J. Exp. Psych. 23, 439–477 (1938).

171 H. Helson, D.B. Judd, and M.H. Warren, Object color changes from daylight to incandescent filament illumination, Illum. Eng. 47, 221–233 (1952).

172 E. Hering, Outlines of a theory of the light sense, Harvard Univ. Press, Cambridge (1920). (trans. by L.M. Hurvich and D. Jameson, 1964.).

173 T. Hoshino and R.S. Berns, Color gamut mapping techniques for color hard copy images, Proc. SPIE, 1909, 152–165 (1993).

174 P.-C. Hung, Colorimetric calibration for scanners and media, Proc. SPIE 1448, 164–174 (1991).

175 P.-C. Hung, Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-uptable model and interpolations, J. Electronic Imaging 2, 53–61 (1993).

176 P.-C. Hung and R.S. Berns, Determination of constant hue loci for a CRT gamut and their predictions using color apppearance spaces, Color Res. Appl. 20, 285–295 (1995).

177 D.M. Hunt, S.D. Kanwaljit, J.K. Bowmaker, and J.D. Mollon, The chemistry of John Dalton's color blindness, Science 267, 984–988 (1995).

178 D.M. Hunt, K.S. Dulai, J.A. Cowing, C. Julliot, J.D. Mollon, J.K. Bowmaker, W.-H. Li, D. Hewett-Emmett, Molecular evolution of trichromacy in primates, Vision Res. 38, 3299–3306 (1998).

179 R.W.G. Hunt, The effects of daylight and tungsten light-adaptation on color perception, J. Opt. Soc. Am. 40, 362–371 (1950).

180 R.W.G. Hunt, Light and dark adaptation and the perception of color, J. Opt. Soc. Am. 42, 190–199 (1952).

181 R.W.G. Hunt, Objectives in colour reproduction, J. Phot. Sci. 18, 205–215 (1970).

182 R.W.G. Hunt, I.T. Pitt, and L.M. Winter, The preferred reproduction of blue sky, green grass and caucasian skin in colour photography, J. Phot. Sci. 22, 144–150 (1974).

183 R.W.G. Hunt and L.M. Winter, Colour adaptation in picture-viewing situations, J. Phot. Sci. 23, 112–115 (1975).

184 R.W.G. Hunt, Sky-blue pink, Color Res. Appl. 1, 11–16 (1976).

185 R.W.G. Hunt, The specification of colour appearance. I. Concepts and terms, Color Res. Appl. 2, 55–68 (1977).

186 R.W.G. Hunt, Colour terminology, Color Res. Appl. 3, 79–87 (1978).

187 R.W.G. Hunt, A model of colour vision for predicting colour appearance, Color Res ppl. 7, 95–112 (1982).

188 R.W.G. Hunt and M.R. Pointer, A colour-appearance transform for the CIE 1931 standard colorimetric observer, Color Res. Appl. 10, 165–179 (1985).

189 R.W.G. Hunt, A model of colour vision for predicting colour appearance in various viewing conditions, Color Res. Appl. 12, 297–314 (1987).

190 R.W.G. Hunt, Hue shifts in unrelated and related colours, Color Res. Appl. 14, 235–239 (1989).

191 R.W.G. Hunt, Measuring Colour, 2nd Ed., Ellis Horwood, New York, (1991a).

192 R.W.G. Hunt, Revised colour-appearance model for related and unrelated colours, Color Res. Appl. 16, 146–165 (1991b).

193 R.W.G. Hunt, Standard sources to represent daylight, Color Res. Appl. 17, 293–294 (1992).

194 R.W.G. Hunt, An improved predictor of colourfulness in a model of colour vision, Color Res. Appl. 19, 23–26 (1994).

195 R.W.G. Hunt and M.R. Luo, Evaluation of a model of colour vision by magnitude scalings: Discussion of collected results, Color Res. Appl. 19, 27–33 (1994).

196 R.W.G. Hunt, The Reproduction of Colour, 5th Ed., Fountain Press, England, (1995).

197 R.W.G. Hunt, Personal Communication, October 14, (1996).

198 R.W.G. Hunt, Measuring Color, 3rd Ed., Fountain Press, England (1998).

199 R.W.G. Hunt, C.J. Li, and M.R. Luo, Dynamic cone response function for models of colour appearance, Color Res. Appl. 28, 82–88 (2003).

200 R.S. Hunter and R.W. Harold, The Measurement of Appearance, 2nd Ed., Wiley, New York (1987).

201 L.M. Hurvich and D. Jameson, A psychophysical study of white. III. Adaptation as a variant, J. Opt. Soc. Am. 41, 787–801 (1951).

202 L.M. Hurvich, Color Vision, Sinauer Associates, Sunderland, Mass., (1981).

203 T. Indow, Multidimensional studies of Munsell color solid, Psych. Rev. 95, 456–470 (1988).

204 International Color Consortium, ICC Profile Format Specification, Version 3.3 (1996).

205 (http://www.color.org) D. Jameson and L.M. Hurvich, Some quantitative aspects of an opponent-colors theory: I. Chromatic responses and spectral saturation, J. Opt. Soc. Am. 45, 546–552 (1955).

206 D. Jameson and L.M. Hurvich, Essay concerning color constancy, Ann. Rev. Psychol. 40, 1–22 (1989).

207 J.F. Jarvis, C.N. Judice, and W.H. Ninke, A survey of techniques for the display of continuous tone images on bilevel displays, Comp. Graphics Image Proc. 5, 13–40 (1976).

208 E.W. Jin and S.K. Shevell, Color memory and color constancy, J. Opt. Soc. Am. A 13, 1981–1991 (1996).

209 D.J. Jobson, Z. Rahman, and G.A. Woodell, A multi-scale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes, IEEE Trans. Im. Proc. 6, 956–976 (1997).

210 G.M. Johnson and M.D. Fairchild, Full-spectral color calculations in realistic image synthesis, IEEE Computer Graphics & Applications 19:4, 47–53 (1999).

211 G.M. Johnson and M.D. Fairchild, Sharpness rules, Proc of IS&T/SID 8th Color Imaging Conference, 24–30 (2000).

212 G.M. Johnson and M.D. Fairchild, On contrast sensitivity in an image difference model, Proc. of IS&T PICS Conference, 18–23 (2001a).

213 G.M. Johnson and M.D. Fairchild, Darwinism of color image difference models, Proc. of IS&T/SID 9th Color Imaging Conference, 108–112 (2001b).

214 G.M. Johnson and M.D. Fairchild, Measuring images: Differences, quality, and appearance, SPIE/IS&T Electronic Imaging Conference, SPIE Vol. 5007, Santa Clara, 51–60 (2003a).

215 G.M. Johnson and M.D. Fairchild, A top down description of S-CIELAB and CIEDE2000, Color Res. Appl. 28, 425–435 (2003b).

216 G.M. Johnson and M.D. Fairchild, Rendering HDR images, IS&T/SID 11th Color Imaging Conference, Scottsdale, 36–41 (2003c).

217 D.B. Judd, Hue, saturation, and lightness of surface colors with chromatic illumination, J. Opt. Soc. Am. 30, 2–32 (1940).

218 D.B. Judd, Appraisal of Land's work on two-primary color projections, J. Opt. Soc m. 50, 254–268 (1960).

219 P.K. Kaiser and R.M. Boynton, Human Color Vision, 2nd Ed., Optical Society of America, Washington, (1996).

220 H. Kang, Color scanner calibration, J. Imaging Sci. Tech. 36, 162–170 (1992).

221 H. Kang, Color Technology for Electronic Imaging Devices, SPIE, Bellingham, Wash. (1997).

222 J.M. Kasson, W. Plouffe, and S.I. Nin, A tetrahedral interpolation technique for color space conversion, Proc. SPIE 1909, 127–138 (1993).

223 J.M. Kasson, S.I. Nin, W. Plouffe, and J.L. Hafner, Performing color space conversions with three-dimensional linear interpolation, J. Elec. Imaging 4, 226–250 (1995).

224 N. Katoh, Practical method for appearance match between soft copy and hard copy, in Device-Independent Color Imaging, SPIE Vol. 2170, 170–181 (1994).

225 N. Katoh, Appearance match between soft copy and hard copy under mixed chromatic adaptation, IS&T/SID 3rd Color Imaging Conference, Scottsdale 22–25 (1995).

226 D. Katz, The World of Colour, Trubner & Co., London (1935).

227 B.W. Keelan, Handbook of Image Quality: Characterization and Prediction, Marcel Dekker, New York, NY (2002).

228 D.H. Kelly, Ed., Visual Science and Engineering: Models and Applications, Marcel Dekker, New York (1994).

229 T.G. Kim, R.S. Berns, and M.D. Fairchild, Comparing appearance models using pictorial images, IS&T/SID 1st Color Imaging Conference, Scottsdale, Ariz. 72–77 (1993).

230 J.J. Koenderink and W.A. Richards, Why is snow so bright?, J. Opt. Soc. Am. A 9, 643–648 (1992).

231 J.M. Kraft and J.S. Werner, Spectral efficiency across the life span: flicker photometry and brightness matching, J. Opt. Soc. Am. A 11, 1213–1221 (1994).

232 J.B. Kruskal and M. Wish, Multidimensional Scaling, Sage Publications, Thousand Oaks, CA, (1978).

233 R.G. Kuehni, Color Space and Its Divisions: Color Order from Antiquity to the Present, John Wiley & Sons, Hoboken (2003).

234 W.-G. Kuo, M.R. Luo, and H.E. Bez, Various chromatic-adaptation transformations tested using new colour appearance data in textiles, Color Res. Appl. 20, 313–327 (1995).

235 I. Kuriki and K. Uchikawa, Limitations of surface-color and apparent-color constancy, J. Opt. Soc. Am. A 13, 1622–1636 (1996).

236 E.H. Land, Color vision and the natural image part II, Proc. Nat. Acad. Sci., 45, 636–644 (1959).

237 E.H. Land, The retinex, American Scientist 52, 247–264 (1964).

238 E.H. Land and J.J. McCann, Lightness and the retinex theory, J. Opt. Soc. Am. 61, 1–11 (1971).

239 E.H. Land, The retinex theory of color vision, Scientific American 237, 108–128 (1977).

240 E.H. Land, Recent advances in retinex theory, Vision Res. 26, 7–21 (1986).

241 P. Lennie and M. D'Zmura, Mechanisms of color vision, CRC Critical Reviews in Neurobiology 3, 333–400 (1988).

242 B. Li, G.W. Meyer, and R.V. Klassen, A comparison of two image quality models, SPIE/ IS&T Electronic Imaging Conference, SPIE Vol. 3299, San Jose, 98–109 (1998).

243 C.J. Li, M.R. Luo and R.W.G. Hunt, The CAM97s2 model, IS&T/SID 7th Color Imaging Conference, Scottsdale 262–263 (1999).

244 C.J. Li, M.R. Luo and R.W.G. Hunt, A revision of the CIECAM97s model, Color Res ppl. 25 260–266 (2000a).

245 C.J. Li, M.R. Luo and B. Rigg, Simplification of the CMCCAT97, IS&T/SID 8th Color Imaging Conference, Scottsdale 56–60 (2000b).

246 C.J. Li, M.R. Luo, R.W.G. Hunt, N. Moroney, M.D. Fairchild and T. Newman The performance of CIECAM02, IS&T/SID 10th Color Imaging Conference, Scottsdale 28–32 (2002).

247 C.J. Li, M.R. Luo and G. Cui, Colour-differences evaluation using colour appearance models, IS&T/SID 11th Color Imaging Conference, Scottsdale 127–131 (2003).

248 Y. Liu, J. Shigley, E. Fritsch, and S. Hemphill, Abnormal hue-angle change of the gemstone tanzanite between CIE illuminants D65 nad A in CIELAB color space, Color Res. Appl. 20, 245–250 (1995).

249 M.-C. Lo, M.R. Luo, and P.A. Rhodes, Evaluating colour models' performance between monitor and print images, Color Res. Appl. 21, 277–291 (1996).

250 A. Logvinenko and G. Menshikova, Trade-off between achromatic colour and perceived illumination as revealed by the use of pseudoscopic inversion of apparent depth, Perception 23, 1007–1023 (1994).

251 A.D. Logvinenko, On derivation of spectral sensitivities of the human cones from trichromatic colour matching functions, Vision Res. 38, 3207–3211 (1998).

252 R.B. Lotto and D. Purves, The empricial basis of color perception, Consciousness and Cognition 11, 609–629 (2002).

253 J. Lubin, The use of psychophysical data and models in the analysis of display system performance, in Digital Images and Human Vision, A. Watson, Ed., MIT, Cambridge, 163–178 (1993).

254 J. Lubin, A visual discrimination model for imaging system design and evaluation, in Vision Models for target Detection and Recognition, E. Peli, Ed., World Scientific, Singapore, 245–283 (1995).

255 M.R. Luo, A.A. Clarke, P.A. Rhodes, A. Schappo, S.A.R. Scrivner, and C.J. Tait, Quantifying colour appearance. Part I. LUTCHI colour appearance data, Color Res ppl. 16, 166–180 (1991a).

256 M.R. Luo, A.A. Clarke, P.A. Rhodes, A. Schappo, S.A.R. Scrivner, and C.J. Tait, Quantifying colour appearance. Part II. Testing colour models performance using LUTCHI color appearance data, Color Res. Appl. 16, 181–197 (1991b).

257 M.R. Luo, X.W. Gao, P.A. Rhodes, H.J. Xin, A.A. Clarke, and S.A.R. Scrivner, Quantifying colour appearance. Part III. Supplementary LUTCHI color appearance data, Color Res. Appl. 18, 98–113 (1993a).

258 M.R. Luo, X.W. Gao, P.A. Rhodes, H.J. Xin, A.A. Clarke, and S.A.R. Scrivner, Quantifying colour appearance. Part IV. Transmissive media, Color Res. Appl. 18, 191–209 (1993b).

259 M.R. Luo, X.W. Gao, and S.A.R. Scrivner, Quantifying colour appearance. Part V.

260 Simultaneous contrast, Color Res. Appl. 20, 18–28 (1995).

261 M.R. Luo, M.-C. Lo, and W.-G. Kuo, The LLAB(l:c) colour model, Color Res. Appl. 21, 412–429 (1996).

262 M.R. Luo and J. Morovic, Two unsolved issues in colour management — colour appearance and gamut mapping, 5th International Conference on High Technology, Chiba, Japan, 136–147 (1996).

263 M.R. Luo, G. Cui, and B. Rigg, The development of the CIE 2000 Colour Difference Formula, Color Res. Appl. 26, 340–350 (2001).

264 D.L. MacAdam, Chromatic adaptation, J. Opt. Soc. Am. 46, 500–513 (1956).

265 D.L. MacAdam, A nonlinear hypothesis for chromatic adaptation, Vis. Res. 1, 9–41 (1961).

266 D.L. MacAdam, Uniform color scales, J. Opt. Soc. Am. 64, 1691–1702 (1974).

267 D.L. MacAdam, Colorimetric data for samples of the OSA uniform color scales, J. Opt. Soc. Am. 68, 121–130 (1978).

268 D.L. MacAdam, Ed., Selected Papers on Colorimetry — Fundamentals, SPIE Milestone Series, Vol. MS 77, SPIE, Bellingham, Wash. (1993).

269 L.T. Maloney and B.A. Wandell, Color constancy: A method for recovering surface spectral reflectance, J. Opt. Soc. Am. A 3, 29–33 (1986).

270 D. Marr, Vision, Freeman, New York (1982).

271 R. Mausfeld and R. Niederee, An inquiry into relational concepts of colour, based on incremental principles of colour coding for minimal relational stimuli, Perception 22, 427–462 (1993).

272 B. Maximus, A. De Metere, and J.P. Poels, Influence of thickness variations in LCDs on color uniformity, SID 94 Digest, 341–344 (1994).

273 J.C. Maxwell, On the theory of three primary colors, Proc. Roy. Inst., 3, 370–375 (1858–62).

274 C.S. McCamy, H. Marcus, and J.G. Davidson, A color rendition chart, J. App. Phot.

275 Eng. 11, 95–99 (1976).

276 J.J. McCann, S. McKee, and T. Taylor, Quantitative studies in retinex theory: A comparison between theoretical predictions and observer responses to 'Color Mondrian' experiments, Vision Res. 16, 445–458 (1976).

277 J. McCann, Color Sensations in Complex Images, IS&T/SID 1st Color Imaging Conference, Scottsdale, 16–23 (1993).

278 E.D. Montag and M.D. Fairchild, Simulated color gamut mapping using simple rendered images, Proc. SPIE 2658, 316–325 (1996).

279 E.D. Montag and M.D. Fairchild, Evaluation of gamut mapping techniques using simple rendered images and artificial gamut boundaries, IEEE Transactions on Image Processing 6, 977–989 (1997).

280 E.D. Montag, Louis Leon Thurstone in Monte Carlo: Creating error bars for the method of paired comparison, Proceedings of the SPIE/IS&T Electronic Imaging Conference, in press (2004).

281 L. Mori and T. Fuchida, Subjective evaluation of uniform color spaces used for colorrendering specification, Color Res. Appl. 7, 285–293 (1982).

282 L. Mori, H. Sobagaki, H. Komatsubara, and K. Ikeda, Field trials on CIE chromatic adaptation formula, Proceedings of the CIE 22nd Session, Melbourne, 55–58 (1991).

283 N. Moroney, Assessing hue constancy using gradients, Proceedings of the SPIE/IS&T Electronic Imaging Conference 3963, 294–300 (2000a).

284 N. Moroney, Local color correction using non-linear masking, Proc. of IS&T/SID 8th Color Imaging Conference, 108–111 (2000b).

285 N. Moroney, M.D. Fairchild, R.W.G. Hunt, C.J Li, M.R. Luo, and T. Newman, The CIECAM02 color appearance model, IS&T/SID 10th Color Imaging Conference, Scottsdale, 23–27 (2002).

286 N. Moroney, A hypothesis regarding the poor blue constancy of CIELAB, Color Res pp. 28, 371–378 (2003).

287 K.T. Mullen, The contrast sensitivity of human color vision to red-green and blueyellow chromatic gratings, J. of Physiology 359, 381–400 (1985).

288 M. Murphy, Golf in the Kingdom, Viking, New York (1972).

289 Y. Nayatani, K. Takahama, and H. Sobagaki, Estimation of adaptation effects by use of a theoretical nonlinear model, Proceedings of the 19th CIE Session, Kyoto, 1979, CIE Publ. No. 5, 490–494 (1980).

290 Y. Nayatani, K. Takahama, and H. Sobagaki, Formulation of a nonlinear model of chromatic adaptation, Color Res. Appl. 6, 161–171 (1981).

291 Y. Nayatani, K. Takahama, H. Sobagaki, and J. Hirono, On exponents of a nonlinear model of chromatic adaptation, Color Res. Appl. 7, 34–45 (1982).

292 Y. Nayatani, K. Takahama, and H. Sobagaki, Prediction of color appearance under various adapting conditions, Color Res. Appl. 11, 62–71 (1986).

293 Y. Nayatani, K. Hashimoto, K. Takahama, and H. Sobagaki, A nonlinear colorappearance model using Estevez–Hunt–Pointer primaries, Color Res. Appl. 12, 231–242 (1987).

294 Y. Nayatani, K. Takahama, and H. Sobagaki, Field trials on color appearance of chromatic colors under various light sources, Color Res. Appl. 13, 307–317 (1988).

295 Y. Nayatani, K. Takahama, H. Sobagaki, and K. Hashimoto, Color-appearance model and chromatic adaptation transform, Color Res. Appl. 15, 210–221 (1990a).

296 Y. Nayatani, T. Mori, K. Hashimoto, K. Takahama, and H. Sobagaki, Comparison of color-appearance models, Color Res. Appl. 15, 272–284 (1990b).

297 Y. Nayatani, Y. Gomi, M. Kamei, H. Sobagaki, and K. Hashimoto, Perceived lightness of chromatic object colors including highly saturated colors, Color Res. Appl. 17, 127–141 (1992).

298 Y. Nayatani, Revision of chroma and hue scales of a nonlinear color-appearance model, Color Res. Appl. 20, 143–155 (1995).

299 Y. Nayatani, H. Sobagaki, K. Hashimoto, and T. Yano, Lightness dependency of Chroma scales of a nonlinear color-appearance model and its latest formulation, Color Res. Appl. 20, 156–167 (1995).

300 Y. Nayatani, A simple estimation method for effective adaptation coefficient, Color Res. Appl. 22, 259–274 (1997).

301 S.M. Newhall, Preliminary report of the O.S.A. subcommittee on the spacing of the Munsell colors, J. Opt. Soc. Am. 30, 617–645 (1940).

302 T. Newman and E. Pirrotta, The darker side of colour appearance models and gamut mapping, Proceedings of Colour Image Science 2000, Derby 215–223 (2000).

303 D. Nickerson, History of the Munsell Color System and its scientific application, J. Opt. Soc. Am. 30, 575–586 (1940).

304 D. Nickerson, History of the Munsell Color System, Company, and Foundation, I., Color Res. Appl. 1, 7–10 (1976a).

305 D. Nickerson, History of the Munsell Color System and its scientific application, Color Res. Appl. 1, 69–77 (1976b).

306 D. Nickerson, History of the Munsell Color System, Color Res. Appl. 1, 121–130 (1976c).

307 T.H. Nilsson and T.M. Nelson, Delayed monochromatic hue matches indicate characteristics of visual memory, J. Exp. Psych.: Human Perception and Performance 7, 141–150 (1981).

308 I. Nimeroff, J.R. Rosenblatt, and M.C. Dannemiller, Variability of spectral tristimulus values, J. Res. NBS 65, 475–483 (1961).

309 OSA, Psychological concepts: Perceptual and affective aspects of color, Chapter 5 in The Science of Color, Optical Society of America, Washington, 145–171 (1963).

310 S.E. Palmer, Vision Science: Photons to Phenomenology, MIT Press, Cambridge (1999).

311 S.N. Pattanaik, J.A. Ferwerda, M.D. Fairchild, and D.P. Greenberg, A multiscale model of adaptation and spatial vision for image display, Proceedings of SIGGRAPH 98, 287–298 (1998).

312 H. Pauli, Proposed extnsion of the CIE recommendation on Uniform color spaces, color difference equations, and metric color terms, J. Opt. Soc. Am. 36, 866–867 (1976).

313 E. Pirrotta and M.D. Fairchild, Directly testing chromatic-adaptation models using object colors, Proceedings of the 23rd Session of the CIE (New Delhi) Vol. 1, 77–78 (1995).

314 A.B. Poirson and B.A. Wandell, Appearance of colored patterns: Pattern-color separability, J. Opt. Soc. Am. A 10, 2458–2470 (1993).

315 A.B. Poirson and B.A. Wandell, Pattern-color separable pathways predict sensitivity to simple colored patterns, Vision Res. 36, 515–526 (1996).

316 J. Pokorny, V.C. Smith, and M. Lutze, Aging of the human lens, Appl. Opt. 26, 1437–1440 (1987).

317 D.M. Purdy, Spectral hue as a function of intensity, Am. J. Psych, 43, 541–559 (1931).

318 D. Purves, R.B. Lotto, and S. Nundy, Why we see what we do, American Scientist 90, 236–243 (2002).

319 E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda, Gradient domain high dynamic range compression, Proceedings of SIGGRAPH 2002, San Antonio, 267–276 (2002).

320 K. Richter, Cube-root color spaces and chromatic adaptation,Color Res. Appl. 5, 7–11 (1980).

321 K. Richter, Farbempfindungsmerkmal Elementarbuntton und Buntheitsabstande als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld, Bundesanstalt fur Materialprufung (BAM) Forschungsbericht 115, Berlin, (1985).

322 M. Richter and K. Witt, The story of the DIN color system, Color Res. Appl. 11, 138–145 (1986).

323 O. Rinner and K.R. Gegenfurtner, Time course of chromatic adaptation for color appearance discrimination, Vision Res. 40, 1813–1826 (2000).

324 A.R. Robertson, A new determination of lines of constant hue, AIC Color 69, Stockholm, 395–402 (1970).

325 R. Robertson, The CIE 1976 color-difference formulae, Color Res. Appl. 2, 7–11 (1977).

326 A.R. Robertson, Historical development of CIE recommended color difference equations, Color Res. Appl. 15, 167–170 (1990).

327 A.R. Robertson, Figure 6–2 Presented at the 1996 ISCC Annual Meeting, Orlando, Fla. (1996).

328 M.A. Rodriguez and T. G. Stockham, ‘Producing colorimetric data from densitometric scans,’ Proc. SPIE 1913, 413–418 (1993).

329 R. Rolleston and R. Balasubramanian, ‘Accuracy of various types of Neugebauer Model,’ Proceedings IS&T/SID Color Imaging Conference, Scottsdale, Ariz., 32–37 (1993).

330 Sarnoff Corporation, JND: A human vision system model for objective picture quality measurement, Sarnoff Technical Report from www.jndmetrix.com, (2001).

331 O.H. Schade, Optical and photoelectric analog of the eye, J. Opt. Soc. Am. 46, 721–739 (1956).

332 B.E. Schefrin and J.S. Werner, Age-related changes in the color appearance of broadband surfaces, Color Res. Appl. 18, 380–389 (1993).

333 J. Schirillo, A. Reeves, and L. Arend, Perceived lightness, but not brightness, of achromatic surfaces depends on perceived depth information, Perception & Psychophysics 48, 82–90 (1990).

334 J. Schirillo and S.K. Shevell, Lightness and brightness judgments of coplanar retinally noncontiguous surfaces, J. Opt. Soc. Am. A 10, 2442–2452 (1993).

335 J. Schirillo and L. Arend, Illumination changes at a depth edge can reduce lightness constancy, Perception & Psychophysics 57, 225–230 (1995).

336 J. Schirillo and S.K. Shevell, Brightness contrast from inhomogeneous surrounds, Vision Res. 36, 1783–1796 (1996).

337 T. Seim and A. Valberg, Towards a uniform colorspace: A better formula to describe the Munsell and OSA Color Scales, Color Res. Appl. 11, 11–24 (1986).

338 C.C. Semmelroth, Prediction of lightness and brightness on different backgrounds, J. Opt. Soc. Am., 60, 1685–1689 (1970).

339 G. Sharma and H.J. Trussel, Digital color imaging, IEEE Trans. Im. Proc. 6, 901–932 (1997).

340 G. Sharma, Ed., Digital Color Imaging Handbook, CRC Press, Boca Raton (2003).

341 S.K. Shevell, The dual role of chromatic backgrounds in color perception, Vision Res.

342 18, 1649–1661 (1978).

343 S.K. Shevell, Color and brightness: Contrast and context, IS&T/SID 1st Color Imaging Conference, Scottsdale, 11–15 (1993).

344 J.M. Speigle and D.H. Brainard, Is color constancy task independent?, IS&T/SID 4th Color Imaging Conference, Scottsdale, 167–172 (1996).

345 L. Spillman and J.S. Werner, Visual Perception: The Neurophysiological Foundations, Academic Press, San Diego, (1990).

346 R. Stanziola, The Colorcurve System®, Color Res. Appl. 17, 263–272 (1992).

347 S.S. Stevens, To honor Fechner and repeal his law, Science 133, 80–86 (1961).

348 J.C. Stevens and S.S. Stevens, Brightness functions: Effects of adaptation, J. Opt.

349 Soc. Am. 53, 375–385 (1963).

350 W.S. Stiles and J.M. Burch, N.P.L. colour-matching investigation: Final report (1958), Optica Acta 6, 1–26 (1959).

351 A. Stockman, L.T. Sharpe, and C. Fach, The spectral sensitivity of the human shortwavelength sensitive cones derived from threshold and color matches, Vision Res. 39, 2901–2927 (1999).

352 A. Stockman and L.T. Sharpe, The spectral sensitivities of the middle- and longwavelength- sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype, Vision Res. 40, 1711–1737 (2000).

353 M. Stokes, M. Fairchild, and R.S. Berns, Precision requirements for digital color reproduction, ACM Trans. Graphics 11, 406–422 (1992).

354 M.C. Stone, W.B. Cowan, and J.C. Beatty, Color gamut mapping and the printing of digital images, ACM Trans. Graphics 7, 249–292 (1988).

355 M.C. Stone, A Field Guide to Digital Color, A.K. Peters, Natick (2003).

356 G. Svaetichin, Spectral response curves from single cones, Acta Physiologica Scandinavica 39 (Suppl. 134), 17–46 (1956).

357 K. Takahama, H. Sobagaki, and Y. Nayatani, Analysis of chromatic adaptation effect by a linkage model, J. Opt. Soc. Am. 67, 651–656 (1977).

358 K. Takahama, H. Sobagaki, and Y. Nayatani, Formulation of a nonlinear model of chromatic adaptation for a light-gray background, Color Res. Appl. 9, 106–115 (1984).

359 R. Taya, W.H. Ehrenstein, and C.R. Cavonius, Varying the strength of the Munker– White effect by stereoscopic viewing, Perception 24, 685–694 (1995).

360 C.C. Taylor, Z. Pizlo, J.P. Allebach, and C.A. Bouman, Image quality assessment with a Gabor pysamid model of the human visual system, IS&T/SPIE Electronic Imaging Conference, SPIE Vol. 3016, San Jose, 58–69 (1997).

361 C.C. Taylor, Z. Pizlo, and J.P. Allebach, Perceptually relevant image fidelity, IS&T/ SPIE Electronic Imaging Conference, SPIE Vol. 3299, San Jose, 110–118 (1998).

362 H. Terstiege, Chromatic adaptation: A state-of-the-art report, J. Col. & Appear. 1, 19–23 (1972).

363 L.L. Thurstone, A law of comparative judgment, Psych. Review 34, 273–286, (1927).

364 L.L. Thurstone, The Measurment of Values, University of Chicago Press, Chicago (1959).

365 D.J. Tolhurst and D.J. Heeger, Comparison of contrast-normalization and threshold models of the responses of simple cells in cat striate cortex, Visual Neuroscience 14, 293–309 (1997).

366 W.S. Torgerson, A law of categrocial judgment, in Consumer Behavior, L.H. Clark, Ed., New York University Press, New York, 92–93 (1954).

367 W.S. Torgerson, Theory and Methods of Scaling, Wiley, New York (1958)

368 A. Valberg and B. Lange-Malecki, ‘Colour constancy’ in Mondrian patterns: A partial cancellation of physical chromaticity shifts by simultaneous contrast, Vision Res. 30, 371–380 (1990).

369 J. von Kries, Chromatic adaptation, Festschrift der Albrecht-Ludwig-Universitat, (Fribourg) (1902) [Translation: D.L. MacAdam, Sources of Color Science, MIT Press, Cambridge, (1970)].

370 J. Walraven, Discounting the background — the missing link in the explanation of chromatic induction, Vision Res. 16, 289–295 (1976).

371 B.A. Wandell, Color appearance: The effects of illumination and spatial pattern, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 90, 9778–9784 (1993).

372 B.A. Wandell, Foundations of Vision, Sinauer, Sunderland, Mass., (1995)

373 A.B. Watson, Toward a perceptual video quality metric, Human Vision and Electronic Imaging III, SPIE Vol. 3299, 139–147 (1998)

374 A.B. Watson and C.V. Ramirez, A standard observer for spatial vision, Investigative Ophthalmology and Visual Science 41, S713 (2000)

375 A.B. Watson, J. Hu, and J.F. McGowan, DVQ: A digital video quality metric based on human vision, J. of Electronic Imaging 10, 20–29 (2001).

376 M.A. Webster and J.D. Mollon, The influence of contrast adaptation on color appearance, Vision Res. 34, 1993–2020 (1994).

377 M.A. Webster and J.D. Mollon, Adaptation and the color statistics of natural images, Vision Res. 37, 3283–3298 (1997).

378 J.S. Werner and B.E. Schefrin, Loci of achromatic points throughout the life span, J. Opt. Soc. Am. A 10, 1509–1516 (1993).

379 D.R. Williams, N. Sekiguchi, W. Haake, D. Brainard, and O. Packer, The cost of trichromacy for spatial vision, in From Pigments to Perception (A. Valberg and B.B. Lee, Eds.), Plenum Press, New York 11–22 (1991).

380 M. Wolski, J.P. Allebach, and C.A. Bouman, Gamut mapping: Squeezing the most out of your color system, IS&T/SID 2nd Color Imaging Conference, Scottsdale, 89–92 (1994).

381 W.D. Wright, A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours, Trans. Opt. Soc. 30, 141–161 (1928–29).

382 W.D. Wright, Why and how chromatic adaptation has been studied, Color Res. Appl. 6, 147–152 (1981a).

383 W.D. Wright, 50 years of the 1931 CIE standard observer for colorimetry, AIC Color 81, Paper A3 (1981b).

384 D.R. Wyble and M.D. Fairchild, Prediction of Munsell appearance scales using various color appearance models, Color Res. Appl. 25, 132–144 (2000).

385 G. Wyszecki, Current developments in colorimetry, AIC Color 73, 21–51 (1973).

386 G. Wyszecki and W.S. Stiles, Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, Wiley, New York, (1982).

387 G. Wyszecki, Color appearance, Chapter 9 in Handbook of Perception and Human Performance, Wiley, New York, (1986).

388 X. Zhang and B.A. Wandell, A spatial extension of CIELAB for digital color image reproduction, SID 96 Digest, (1996).